



Luís Diogo da Silva Casimiro

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Controlo de conversores de eletrónica de potência para integração com SMES na melhoria da qualidade de energia elétrica

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor João Pina FCT-UNL

Co-orientador: Professor Doutor João Martins FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto

Arguente: Prof. Doutor Vitor Manuel de Carvalho Fernão Pires

Vogais: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins

Prof. Doutor João Miguel Murta Pina



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2013

Controlo de conversores de eletrónica de potência para integração com SMES na melhoria da qualidade de energia elétrica.

Copyright © Luís Diogo da Silva Casimiro, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a quem tornou esta dissertação possível, os meus orientadores, os professores João Murta Pina e João Martins, quer por toda a colaboração prestada durante o desenvolvimento desta dissertação, quer por aumentarem o meu interesse pela área das energias, através dos conhecimentos transmitidos no decorrer do meu percurso académico.

Aproveito também para desejar a continuação de um bom trabalho aos futuros doutores da sala 1.8. Boa gente, sempre bem-humorada e pronta a ajudar quando solicitado, a todos vocês um forte abraço.

A todos os colegas e amigos que me acompanharam ao longo deste percurso. Fizeram de mim não só um melhor jogador de PES, como tornaram algumas das horas passadas a trabalhar em momentos muito mais agradáveis. Não vale a pena referir nomes (vocês sabem quem são!), mas a todos, continentais e ilhéus, um brinde da minha parte, sem dúvida que ficarão companheiros para a vida.

Um agradecimento especial à minha família, principalmente aos meus pais. Ainda que nem sempre fácil, investiram na minha educação e apoiaram-me em todos os momentos para que continuasse a mesma. Outro dos meus agradecimentos maiores vai para a Ana, pela força e apoio prestado nestes últimos anos do curso, bem como por me ajudar a organizar e escrever algumas passagens deste documento. Um grande beijo para todos vocês.

Resumo

A qualidade de energia elétrica (QEE) tem sido um aspeto da rede elétrica que ganha cada vez mais importância, tanto na investigação académica como no desenvolvimento de soluções técnicas.

Neste campo, das várias tecnologias existentes para atenuar os efeitos das perturbações na rede elétrica, o *Unified Power Quality Conditioner* (UPQC) apresenta bons resultados, pela combinação das capacidades de filtragem e restauração de tensão dos conversores ativos, paralelo e série. No entanto, em distúrbios de maior duração e situações de sobretensão, o UPQC apresenta algumas limitações, que podem ser suprimidas através da integração de um sistema de armazenamento de energia. Neste trabalho, optou-se pela utilização de uma tecnologia supercondutora, os SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*), dada a sua elevada densidade de potência.

Desta forma, o objetivo desta dissertação é contribuir para a melhoria da qualidade da energia, através do desenvolvimento de um sistema de filtragem ativa unificada integrada com SMES.

O trabalho envolveu uma reflexão sobre os principais problemas que afetam a QEE nas redes de distribuição, as soluções já existentes e um estudo aprofundado dos vários componentes a integrar no dimensionamento do sistema. Na implementação do sistema pretendeu-se fazer uma análise mais detalhada sobre o comportamento desta solução, na compensação de alguns dos principais distúrbios que atingem a rede elétrica. Desenvolveu-se ainda um método de controlo de sobretensões que retira partido das características específicas da tecnologia SMES.

Na avaliação do desempenho da topologia, esta revelou-se bastante eficiente no controlo e compensação de distúrbios de tensão, para além da mitigação de conteúdos harmónicos de corrente, em diferentes tipos de cargas. Apesar de neste trabalho o teste só ter sido realizado em simulações, é de esperar que a sua aplicação prática conduza também a resultados interessantes.

Palavras-chave: Qualidade de Energia Elétrica, Conversores Ativos, UPQC, SMES, Controlo de Sobretensões.

Abstract

The power quality (PQ) is an aspect of the electric network which has been gaining importance in the academic investigation as well as in the development of technical solutions.

In this field, of the several technologies existent to attenuate the effects of the disturbances in the electric network, the Unified Power Quality Conditioner (UPQC) presents good results, due to the combination of filtrate and voltage restoration capacities of the active power converters topologies, series and parallel. However, in disturbances of larger duration and overvoltage situations, the UPQC shows some limitations that can be suppressed through the integration of an energy storage system. In this paper, a superconductor technology was used, the Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES), due to its elevated density of power.

Being so, the objective of this dissertation is to contribute to the improvement of the power quality through the development of a unified active filtering system integrated with SMES.

This work involved a reflexion about the major problems affecting PQ in the distribution networks, the solutions already existent, and a more profound study of the several components to integrate in the dimensioning of the system. In its implementation, a detailed analysis about the behavior of this solution in the compensation of some of the major disturbances hitting the electric network was intended. A control method of overvoltage taking advantage of the specific characteristics of the SMES technology was also developed.

Evaluating the performance of the topology, it has revealed to be quite efficient in the control and compensation of tension disturbances, apart from mitigating harmonic contents of current, in different types of charges. Although the test has only been conducted in simulations in this work, it's expected that its practical application will also lead to interesting results.

Keywords: Power Quality, Active Power Converters, UPQC, SMES, Overvoltage Control.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e Motivação.....	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Principais Contribuições.....	4
1.4. Organização da Dissertação	5
2. Revisão Bibliográfica.....	7
2.1. Problemas na Rede Elétrica.....	7
2.2. Soluções para Mitigar Problemas na Rede Elétrica.....	10
2.2.1. Filtros Passivos.....	10
2.2.2. Filtros Ativos	11
2.2.2.1. Condicionadores Série	12
2.2.2.2. Filtro Ativo Paralelo.....	18
2.2.2.3. Filtros Ativos Unificados	23
2.3. Armazenamento de Energia Elétrica	26
2.3.1. Principais Tecnologias.....	26
2.3.2. Supercondutividade: Principais Propriedades e Tipos de Materiais	27
2.3.3. SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage.....	30
2.3.3.1. Bobina Supercondutora	32
2.3.3.2. Sistema de Condicionamento de Potência.....	33
2.3.3.3. Sistema de Controlo	36
2.4. Técnicas de Modelação	37
2.4.1. SPWM – <i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>	37
2.4.2. Controlo por Histerese.....	38
2.5. Síntese do Capítulo.....	40
3. Dimensionamento e Implementação.....	41
3.1. Sistema SMES	41
3.1.1. Bobina Supercondutora.....	41
3.1.2. Topologia do Sistema de Condicionamento de Potência.....	42
3.1.3. Funcionamento do Sistema de Controlo	43

3.1.4.	<i>DC Link</i>	46
3.2.	Filtro Ativo Paralelo	49
3.2.1.	Dimensionamentos	49
3.2.2.	Sistema de Controlo	51
3.2.3.	Atuação durante Interrupções	52
3.3.	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>	53
3.3.1.	Dimensionamentos	53
3.3.2.	Controlo	55
3.4.	Algoritmos de Detecção de Distúrbios	56
3.5.	Síntese do Capítulo	58
4.	Análise de Resultados	59
4.1.	Considerações Gerais	59
4.2.	Análise de resultados	63
4.2.1.	Carga Resistiva	63
4.2.2.	Carga Não Linear 1	69
4.2.3.	Carga Não Linear 2	75
4.2.4.	Carga Não Linear 3	80
4.3.	Síntese e Conclusões do Capítulo	85
5.	Conclusões e Trabalho Futuro	87
5.1.	Conclusões	87
5.2.	Trabalho Futuro	87
6.	Bibliografia	89
7.	Anexos	95
Anexo 1-	Norma IEC 61000-2-2	95
Anexo 2-	Norma IEEE 519-1992	97
Anexo 3 –	Bloco Fim de Interrupção	99

Índice de Figuras

Figura 2.1: Características das subtensões registadas em linhas aéreas (à esquerda) e subterrâneas (à direita) de média tensão, entre os anos de 1996 e 1998 (EDP, 2005).	7
Figura 2.2: Distúrbios na QEE: a) interrupção, b) sobretensão, c) subtensão e d) harmónicas.	8
Figura 2.3: Filtro passa-baixo LC.	10
Figura 2.4: Filtro sincronizado de frequência única (à esquerda) e amortecido de segunda ordem (à direita).....	11
Figura 2.5: Diagrama unifilar de um filtro ativo série típico com VSI. Adaptado de (Monteiro, 2008).....	12
Figura 2.6: Esquema unifilar típico de um DVR com VSI. Adaptado de (Monteiro, 2008).	13
Figura 2.7: Conversor trifásico constituído por três transformadores monofásicos independentes com inversor em configuração <i>full h-bridge</i> (Pregitzer, 2006).	15
Figura 2.8: Topologia de DVR com energia extraída do lado da rede.	16
Figura 2.9: Topologia de DVR com energia extraída do lado da carga.....	16
Figura 2.10: Diagrama do método de controlo <i>feedforward</i> baseado na utilização de um circuito PLL.	18
Figura 2.11: Esquema unifilar típico de um Filtro Ativo Paralelo com VSI. Adaptado de (Monteiro, 2008).....	19
Figura 2.12: Princípio de funcionamento do FAP. Adaptado de (Monteiro, 2008).	19
Figura 2.13: Conversor trifásico de seis pulsos.	20
Figura 2.14: Diagrama de funcionamento da Teoria <i>p-q</i>	21
Figura 2.15: Diagrama de funcionamento do método SRF.	22
Figura 2.16: Simulação do cálculo das correntes de referência pelo método SRF sob tensões equilibradas e desequilibradas.	23
Figura 2.17: Esquema unifilar típico de um UPQC. Adaptado de (Monteiro, 2008).	24
Figura 2.18: Conversor bidirecional AC/DC trifásico de seis pulsos.	24
Figura 2.19: Diagrama de funcionamento do método SRF com controlo da tensão no lado DC..	25
Figura 2.20: Comparação entre tecnologias de armazenamento de energia eléctrica. Adaptado de (NIPE / UNICAMP, 2005)	27
Figura 2.21: Comportamento da resistência eléctrica do mercúrio de acordo com a temperatura (Onnes, 1913).....	28
Figura 2.22: Diagrama T-J-H típico de um supercondutor (Pina, 2010).....	29
Figura 2.23: Curvas de magnetização de supercondutores: tipo I (tracejado preto) e tipo II (pontado azul). Retirado de (Catalão, 2013).	29
Figura 2.24: Topologia tipo de um sistema SMES (Pina, 2010).	31
Figura 2.25: Estruturas e topologias de implementação de bobinas supercondutoras. Adaptado de (Amaro, 2013).....	32
Figura 2.26: Topologia típica de um CSC comandado a 6 pulsos (Pina, 2010).....	34
Figura 2.27: Topologia típica de um VSC (Pina, 2010).	34

Figura 2.28: Formas de comutação do <i>chopper</i> para os diferentes modos de funcionamento: carga (à esquerda), modo persistente (ao centro) e modo de descarga (à direita). Retirado de (Pina, 2010).....	35
Figura 2.29: Controlo baseado em PWM.....	38
Figura 2.30: Controlo por Histerese.	39
Figura 3.1: Representação unifilar do sistema implementado.....	41
Figura 3.2: Conversor típico VSC com IGBT.....	42
Figura 3.3: Sistema de condicionamento de potência implementado.	42
Figura 3.4: Circuito de dissipação da energia da bobina supercondutora.....	43
Figura 3.5: Evolução da tensão no barramento perante uma sobretensão de 50%, para o condensador utilizado (em cima), para um condensador com uma capacidade de armazenamento de energia igual à SMES.....	44
Figura 3.6: Funcionamento do sistema de controlo da bobina SC.....	45
Figura 3.7: Evolução da corrente na bobina do SMES e tensão no barramento contínuo.	46
Figura 3.8: Evolução da corrente na bobina supercondutora, estando inicialmente descarregada.	47
Figura 3.9: Comportamento da corrente na bobina supercondutora durante sobretensões.....	47
Figura 3.10: Curva de descarga da corrente da bobina SC e respetiva corrente no condensador do barramento DC.....	48
Figura 3.11: Diagrama simplificado do FAP implementado.....	49
Figura 3.12: Tensão mínima do barramento. Adaptado de (Rashid, 2011).	50
Figura 3.13: SRF com controlo da tensão DC através de um controlador PI.....	51
Figura 3.14: Sinal de referência calculado pelo método SRF (a vermelho) e, corrente na saída do FAP (a verde) para a fase correspondente.....	51
Figura 3.15: Funcionamento do sistema implementado durante uma interrupção total.....	52
Figura 3.16: Transitório de tensão antes e depois da aplicação do algoritmo de transição suave.	52
Figura 3.17: Representação simplificada do DVR implementado.	53
Figura 3.18: Conversor monofásico <i>full H-bridge</i> implementado com IGBT e díodos.....	55
Figura 3.19: Sinal de referência calculado pelo método <i>feedforward</i> baseado na utilização de um circuito PLL (a amarelo) e, corrente na saída do DVR (a rosa) para a fase correspondente.....	55
Figura 3.20: Bloco implementado para fazer a diferenciação entre subtensão e sobretensão.....	57
Figura 3.21: Corrente durante a transição para uma interrupção.....	57
Figura 4.1: Onda típica de corrente de um conversor de 6 pulsos com indutor de alto valor de filtragem (à esquerda) e onda gerada (à direita).....	59
Figura 4.2: Espectro harmónico e THD total da onda gerada na carga não linear 1.	60
Figura 4.3: Onda típica de corrente de um conversor de 6 pulsos com condensador de filtragem e indutor série de filtragem (à esquerda) e onda gerada (à direita).....	60
Figura 4.4: Espectro harmónico e THD total da onda gerada na carga não linear 2.	60

Figura 4.5: Onda típica de corrente de um conversor de 6 pulsos com condensador de filtragem (à esquerda) e onda gerada (à direita).....	60
Figura 4.6: Espectro harmónico e THD total da onda gerada na carga não linear 3.	61
Figura 4.7: Espectro harmónico e THD total, na tensão de carga (à esquerda) e na corrente da rede (à direita).	61
Figura 4.8: Evolução da corrente na bobina SC para uma carga resistiva de 5 kW sob diferentes magnitudes de cavas.....	62
Figura 4.9: Evolução da corrente na bobina SC para uma carga resistiva de 2,5 kW sob diferentes magnitudes de cavas.....	62
Figura 4.10: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), para a carga resistiva em funcionamento normal.	63
Figura 4.11: Tensão na rede (em cima), tensão na carga (ao centro) e corrente na carga (em baixo) durante uma cava de tensão monofásica.	64
Figura 4.12: Tensão na rede (em cima), tensão na carga (ao centro) e corrente na carga (em baixo) durante uma cava de tensão trifásica.....	64
Figura 4.13: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), durante o distúrbio de tensão.....	65
Figura 4.14: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).	65
Figura 4.15: Tensão na rede (em cima) e tensão na carga (em baixo) durante uma sobretensão trifásica.	65
Figura 4.16: Corrente na rede (em cima) e corrente na carga (em baixo) durante uma sobretensão trifásica.	66
Figura 4.17: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), durante o distúrbio de tensão.....	66
Figura 4.18: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).	66
Figura 4.19: Tensão na carga (em cima), corrente na rede (ao centro) e corrente na carga (em baixo) durante uma interrupção total.....	67
Figura 4.20: Espectro harmónico da tensão e corrente na carga, durante o distúrbio de tensão.	67
Figura 4.21: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).	68
Figura 4.22: Corrente na rede (em cima), corrente na carga (ao centro) e tensão na carga (em baixo).....	69
Figura 4.23: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita).....	69
Figura 4.24: Evolução da potência reativa na carga e na rede elétrica, com e sem o FAP ligado.	70
Figura 4.25: Tensão na rede (em cima) e tensão na carga (em baixo) durante uma cava de tensão trifásica.	70

Figura 4.26: Corrente na rede (em cima) e corrente na carga (em baixo) durante uma cava de tensão trifásica.	71
Figura 4.27: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), durante o distúrbio de tensão.....	71
Figura 4.28: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).	71
Figura 4.29: Tensão na rede (em cima) e tensão na carga (em baixo) durante uma sobretensão trifásica.	72
Figura 4.30: Corrente na rede (em cima) e corrente na carga (em baixo) durante uma sobretensão trifásica.	72
Figura 4.31: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), durante o distúrbio de tensão.....	72
Figura 4.32: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).	73
Figura 4.33: Corrente na rede (em cima) e corrente na carga (em baixo) durante uma interrupção total.	73
Figura 4.34: Tensão na carga durante uma interrupção total.	74
Figura 4.35: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).	74
Figura 4.36: Corrente na rede (em cima), corrente na carga (ao centro) e tensão na carga (em baixo).	75
Figura 4.37: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), para a carga não linear 2 em funcionamento normal.	75
Figura 4.38: Evolução da potência reativa na carga e na rede elétrica, com e sem o FAP ligado.	76
Figura 4.39: Tensão na rede (em cima) e na carga (em baixo) durante uma cava de tensão trifásica.	76
Figura 4.40: Corrente na rede (em cima) e na carga (em baixo) durante uma cava tensão trifásica.	77
Figura 4.41: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), durante o distúrbio de tensão.....	77
Figura 4.42: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).	77
Figura 4.43: Tensão na rede (em cima) e na carga (em baixo) durante uma sobretensão trifásica.	78
Figura 4.44: Corrente na rede (em cima) e na carga (em baixo) durante uma sobretensão trifásica.	78
Figura 4.45: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita).....	79

Figura 4.46: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).	79
Figura 4.47: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), para a carga não linear sem filtros sincronizados 3 em funcionamento normal.	80
Figura 4.48: Corrente na rede (em cima), corrente na carga (ao centro) e tensão na carga (em baixo).	80
Figura 4.49: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), para a carga não linear 3 em funcionamento normal.	81
Figura 4.50: Evolução da potência reativa na carga e na rede elétrica, com e sem o FAP ligado.	81
Figura 4.51: Tensão na rede (em cima) e tensão na carga (em baixo) durante uma cava de tensão trifásica.	81
Figura 4.52: Corrente na rede (em cima) e na carga (em baixo) durante uma cava de tensão trifásica.	82
Figura 4.53: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), durante o distúrbio de tensão.	82
Figura 4.54: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).	82
Figura 4.55: Tensão na rede (em cima) e na carga (em baixo) durante uma sobretensão trifásica.	83
Figura 4.56: Corrente na rede (em cima) e na carga (em baixo) durante uma sobretensão trifásica.	83
Figura 4.57: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), durante o distúrbio de tensão.	84
Figura 4.58: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).	84
Figura 7.1: Bloco que deteta o fim de uma interrupção.	99

Índice de Tabelas

Tabela 1.1: Perdas financeiras típicas resultantes de sub tensões em alguns setores de atividade (Chapman, 2001).....	2
Tabela 1.2: Principais funcionalidades possíveis de um UPQC (Monteiro, 2008).....	2
Tabela 2.1: Classificação dos problemas de QEE na tensão segundo a norma IEEE 1559-1995.	8
Tabela 2.2: Pontos fortes das configurações solenoidal e toroidal de bobinas supercondutoras. Adaptado de (Oliveira, 2010).....	32
Tabela 3.1: Principais parâmetros da bobina SC.	41
Tabela 7.1: Limites de compatibilidade harmónica de tensão para redes BT.	95
Tabela 7.2: Limites percentuais de harmónicas de corrente para sistemas com tensões entre 120V e 69 kV.	97
Tabela 7.3: Limites percentuais de harmónicas de tensão.	97

Simbologia

$\Delta I_{FAP(p-p)}$	<i>Ripple</i> da corrente pico a pico de compensação fornecida pelo FAP (A).
ΔU_{BC}	Tensão de <i>ripple</i> no condensador do barramento contínuo (V).
ΔV_{DC}	Sinal de erro entre a tensão lida e a tensão de referência no condensador do barramento contínuo (V).
$\alpha\text{-}\beta\text{-}0$	<i>Sistema bifásico estacionário de coordenadas.</i>
$a\text{-}b\text{-}c$	<i>Sistema trifásico de coordenadas.</i>
C_{BC}	Capacidade no condensador do barramento contínuo (F).
f_n	Frequência de corte (Hz).
f_{port}	Frequência do sinal portador (Hz).
f_{ref}	Frequência do sinal modulador (Hz).
f_s	Frequência de comutação dos semicondutores (Hz).
H_C	Campo magnético crítico (A/m).
H_{C1}	Limite inferior do campo magnético crítico (A/m).
H_{C2}	Limite superior do campo magnético crítico (A/m).
H_{inf}	Limite inferior da banda de histerese.
H_{sup}	Limite superior da banda de histerese.
$i_a^*, i_b^* \text{ e } i_c^*$	Componentes da corrente de referência em coordenadas trifásicas nas fases A, B e C (A).
$i_\alpha \text{ e } i_\beta$	Componentes da corrente segundo os eixos do sistema bifásico estacionário (A).
$i_\alpha^* \text{ e } i_\beta^*$	Componentes da corrente de referência segundo os eixos do sistema bifásico estacionário (A).
$i_d \text{ e } i_q$	Componentes da corrente segundo os eixos do sistema bifásico girante (A).
$i_d^* \text{ e } i_q^*$	Componentes da corrente de referência segundo os eixos do sistema bifásico girante (A).
i_F	Corrente de compensação produzida pelo FAP (A).
i_L	Corrente na carga (A).
i_S	Corrente na rede elétrica (A).

I_{conv}	Corrente de saída de cada fase do DVR (A).
I_{crit}	Corrente crítica da bobina supercondutora (A).
I_{FAP}	Corrente de saída no filtro ativo paralelo (A).
I_{max}	Corrente máxima que circula na bobina (A).
I_{min}	Corrente mínima que circula na bobina (A).
I_{ref}	Corrente crítica e referência para a bobina supercondutora (A).
J_C	Densidade de corrente crítica (A/m ²).
k	Razão entre as correntes máximas e mínimas que circulam numa bobina.
K_{dist}	Magnitude máxima em relação à tensão nominal da cava ou sobretensão, a ser compensada.
k_i	Coefficiente representativo da queda de corrente no condensador de filtragem do DVR.
k_I	Ganho integral do controlador PI.
k_P	Ganho proporcional do controlador PI.
k_u	Coefficiente representativo da queda de tensão no indutor de filtragem do DVR.
L_{FAP}	Indutor de filtragem do filtro ativo paralelo (H).
L_{SMES}	Coefficiente de autoindução da bobina supercondutora (H).
m	Índice de modelação.
p	Potência ativa no sistema bifásico (W).
\tilde{p}_L	Conteúdo harmónico da potência ativa (W).
P_{DVR}	Potência ativa fornecida por cada transformador monofásico que compõem o DVR (W).
P_L	Potência ativa na carga (W).
P_{transf}	Potência ativa de cada transformador monofásico que compõem o DVR (W).
q	Potência reativa no sistema bifásico (VAr).
\bar{q}_L	Potência reativa na frequência fundamental (VAr).
\tilde{q}_L	Conteúdo harmónico da potência reativa (VAr).
Q	Fator de qualidade.

r	Razão entre o número de espiras dos lados primário e secundário dos transformadores monofásicos do DVR.
r_m	Razão de frequência de modelação.
R_{FAP}	Perdas internas do conversor FAP (Ω).
S_{atual}	Sinal de referência.
T_C	Temperatura crítica (K).
U_{BC}	Tensão no condensador do barramento contínuo (V).
U_{BC_min}	Tensão mínima no condensador do barramento contínuo (V).
u_c	Tensão composta (V).
U_c	Valor eficaz da tensão composta (V).
U_{dist}	Magnitude do distúrbio de tensão em relação ao valor nominal da tensão na rede elétrica.
u_s	Tensão simples (V).
U_s	Valor eficaz da tensão simples (V).
v_α e v_β	Componentes da tensão segundo os eixos do sistema bifásico estacionário (V).
v_a, v_b e v_c	Tensão simples nas fases A, B e C (V).
v_C	Tensão fornecida pelo condensador (V).
v_L	Tensão na carga (V).
V_{port}	Tensão no sinal portador (V).
V_{ref}	Tensão no sinal modulador (V).
v_s	Tensão na rede elétrica (V).
V_{sec}	Tensão no lado secundário do DVR (V).
W_{mag}	Energia armazenada no campo magnético de uma bobina supercondutora (J).
ω_s	Frequência de comutação (rad/s).
X_C	Reatância capacitiva do filtro passivo de saída do DVR (Ω).
Z_{conv}	Impedância de saída de cada fase do DVR (Ω).

Notações

AC	<i>Alternating current</i> ou corrente alterna, termo também aplicado a tensão alternada.
AE	Armazenamento de Energia.
Bi-2223	Supercondutor de composição química $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{12}$.
BSCOO	Designação genérica de um supercondutor de composição química $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_n\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{6+2n}$, com $n=0, 1, 2$.
CENELEC	Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica (CENELEC)
CSC	Acrónimo de <i>current source converter</i> , ou conversor fonte de corrente.
DC	<i>Direct current</i> ou corrente contínua, termo também aplicado a tensão contínua.
DVR	<i>Dynamic Voltage Restorer</i> .
EP	Eletrónica de Potência.
FA	Filtro Ativo.
FAP	Filtro Ativo Paralelo.
FAS	Filtro Ativo Série.
FP	Filtro Passivo.
GD	Geração Distribuída.
IA	Inteligência Artificial.
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> .
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> .
PI	Controlador proporcional integral.
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i> .
PWM	Acrónimo de <i>Pulse Width Modulation</i> , ou modelação por largura de pulsos.
QEE	Qualidade de Energia Elétrica.
RMS	<i>Root Mean Square</i> .
RQS	Regulamento da Qualidade de Serviço.
SAT	Supercondutor de Alta Temperatura.

SC	Supercondutor.
SCP	Sistema de Condicionamento de Potência;
SMES	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage.</i>
SRF	Acrónimo de <i>Synchronous Reference Frame</i> , ou método dos eixos de referência.
SVPWM	<i>Space Vector Pulse Width Modelation.</i>
THD	Acrónimo de <i>Total Harmonic Distortion</i> , ou Distorção Harmónica Total.
UPFC	<i>Unified Power Flow Controller.</i>
UPQC	<i>Unified Power Quality Conditioner.</i>
UPS	<i>Uninterruptible power supply.</i>
VSC	Acrónimo de <i>voltage source converter</i> , ou conversor fonte de tensão.

1. Introdução

1.1. Enquadramento e Motivação

Desde pequenas coisas do nosso quotidiano como acender uma lâmpada até ao funcionamento de máquinas industriais, a dependência de eletricidade é elemento comum. É por demais evidente a sua importância no desenvolvimento social e económico no mundo que hoje conhecemos. Como tal, garantir um fornecimento eficaz de energia elétrica tornou-se imprescindível.

O conceito de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), ou em inglês *Power Quality* (Bollen, 2000), surgiu pela primeira vez numa publicação em 1968. Por essa altura considerava-se que um sistema elétrico tinha qualidade se garantisse um fornecimento de energia elétrica sem interrupções, ou seja, qualidade era sinónimo de continuidade.

Com o desenvolvimento e proliferação dos dispositivos baseados em eletrónica de potência (EP), verificado a partir da década de 70, alterou-se o perfil das cargas elétricas existentes. Por um lado a utilização de EP possibilita maiores eficiências e maior controlabilidade, contudo estas novas cargas por não consumirem correntes sinusoidais não seguem um comportamento linear, o que as torna também causadoras (e vítimas) de problemas na rede, contribuindo dessa forma para deteriorar a qualidade da energia e originar perdas e degradação dos seus componentes (EDP, 2005; Nogueira, 2010).

A evolução tecnológica e os novos problemas da rede alteraram os moldes que definem a QEE. Hoje em dia, no Regulamento da Qualidade de Serviço (RQS) português, que é o instrumento que estabelece os padrões de qualidade no fornecimento de energia elétrica, a QEE é abordada segundo três padrões individuais¹:

- Continuidade de Serviço: número e duração das interrupções de fornecimento.
- Qualidade da Onda de Tensão: amplitude, frequência, forma da onda e simetria do sistema trifásico da tensão.
- Qualidade Comercial: atendimento, informação, assistência e avaliação da satisfação dos clientes.

Esta nova perceção de como deve ser a energia elétrica vai muito além da simples continuidade do fornecimento, e tais preocupações são cada vez tidas em linha de conta, pois os prejuízos económicos relacionados com perturbações na QEE são bastante elevados. Em (EDP, 2005) são apresentados os resultados de alguns estudos dedicados a estimar estes custos. Segundo o estudo de 1991 da *Business Week*, as perdas custam cerca de 26 mil milhões de dólares/ano só nos EUA. Uma análise da *Fortune Magazine* de 1998, também realizada nos EUA, já refere prejuízos a rondar os 10 mil milhões de dólares/ano. Na União Europeia, um estudo divulgado pela *Copper Development*

¹ Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE). [Consult. 25/08/2013]. Regulamento da Qualidade de Serviço. Disponível em: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/regulamentos/qualidadedeservico/Paginas/default.aspx>

Association (2001), e que considera somente os setores industrial e comercial, estima um volume de perdas de 10 mil milhões euros/ano, enquanto os custos associados à atenuação destes problemas rondam investimentos na ordem 5% do total contabilizado com as perdas. Algumas disparidades de valores devem-se à dificuldade de contabilizar tais efeitos, mas a tendência de grandes prejuízos é comum.

No estudo da *Copper Development Association* (Chapman, 2001) é possível encontrar alguns valores típicos de perdas que derivam de paragens inesperadas ou erros de funcionamento decorrentes de distúrbios com subtensões (Tabela 1.1). Em alguns setores de atividade, por muito pequena que seja a duração da perturbação, retomar o normal decorrer dos trabalhos pode ser um processo de várias horas, ou até mesmo destruir componentes altamente sensíveis como microprocessadores que podem levar dias a ser construídos.

Tabela 1.1: Perdas financeiras típicas resultantes de subtensões em alguns setores de atividade (Chapman, 2001).

Setor	Perdas por Evento
Produção de Semicondutores	3 800 000 €
Trading Financeiro	6 000 000 € (por hora)
Centros de Computação	750 000 €
Telecomunicações	30 000 € (por minuto)
Indústria do Aço	350 000 €
Indústria Vidreira	250 000 €

Como tal, nas últimas décadas várias foram as soluções desenvolvidas para melhorar a qualidade e a continuidade do fornecimento de energia elétrica, sendo os compensadores ativos os mais destacados. Estes dispositivos possuem configurações em série e paralelo, sendo as primeiras mais indicadas para solucionar perturbações ao nível da tensão da rede, e as segundas mais direcionadas a controlar distúrbios na corrente. Da utilização conjunta destes conversores resulta o *Unified Power Quality Conditioner* (UPQC), que permite assim compensar a grande maioria dos problemas relacionados com a qualidade energética presentes num sistema elétrico, nomeadamente no que à distribuição diz respeito (Boyra, 2012). A Tabela 1.2 indica as principais funcionalidades que esta topologia unificada pode apresentar.

Tabela 1.2: Principais funcionalidades possíveis de um UPQC (Monteiro, 2008)

Conversor	Função
Série	<ul style="list-style-type: none"> • Regular tensão • Filtragem ativa da tensão • Compensar desequilíbrios de tensão • Prover estabilidade ao sistema
Paralelo	<ul style="list-style-type: none"> • Filtragem ativa da corrente • Compensar desequilíbrios da corrente • Correção do fator potência • Interface com dispositivos de energias renováveis

Na sua composição, o UPQC possui um barramento em tensão contínua (*DC Link*) que é partilhado pelos dois filtros ativos. Como será verificado na presente dissertação, manter uma tensão constante no *DC Link* é bastante importante para assegurar um bom funcionamento do conversor unificado, principalmente sob distúrbios ao nível da tensão. Para este efeito, são utilizadas cada vez mais tecnologias de armazenamento de energia, que vão muito além de bancos de condensadores. De entre todas as tecnologias de armazenamento de energia existentes atualmente, os *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES) são a solução que mais rapidamente consegue descarregar grandes quantidades de potência. Embora ainda possuam um custo elevado, a descoberta de novos materiais supercondutores nas últimas décadas, associado com novos paradigmas de utilização, perfilam os SMES como uma solução de elevado potencial para aplicações de qualidade de energia.

Assim, a utilização de uma configuração tão abrangente na mitigação de distúrbios da rede elétrica como é o UPQC, complementada com uma das soluções de armazenamento com maior potencial, formaram a base motivacional da dissertação desenvolvida. Não obstante é o facto desta conjugação de UPQC com os dispositivos SMES ser muito pouco retratada na literatura, pelo que o seu estudo constituiu um aliciente ainda maior.

1.2. Objetivos

O principal objetivo do presente trabalho é a melhoria da qualidade da energia elétrica ao nível das redes de distribuição. Para isto, foi desenvolvido um sistema que combina as capacidades individuais de topologias, série e paralelo, de conversores ativos, integrando-se adicionalmente um sistema de armazenamento de energia baseado em tecnologia supercondutora, os SMES.

Os objetivos específicos considerados foram os seguintes:

- Identificar os problemas que afetam a QEE nas redes de distribuição e apresentação de soluções existentes para fazer a sua mitigação, com principal destaque para a topologia UPQC.
- Indicar as principais características dos dispositivos SMES, e compará-los com outras tecnologias de armazenamento de energia.
- Projetar um sistema UPQC e dimensionamento dos sistemas de controlo dos seus conversores ativos e da unidade SMES.
- Simular em *Matlab/Simulink* o sistema implementado, sob diversos distúrbios e para diferentes tipos de cargas.
- Averiguar o comportamento da tensão num condensador com relativa baixa capacidade, quando ligado à rede elétrica através de conversores de potência baseados numa configuração fonte de tensão, nomeadamente sob situações de sobretensão.
- Avaliar o desempenho da topologia utilizada.

1.3. Principais Contribuições

A literatura analisada sobre sistemas que incluem conversão ativa série, encontra-se muitas vezes dedicada somente a estudar situações onde ocorrem cavas de tensão, descartando as situações de sobretensão. Já em situações onde é analisada a resposta destes sistemas perante sobretensões, também é frequente a ausência de informação sobre a evolução da tensão transferida para o lado DC. A análise desta informação é importante, uma vez que na ocorrência de subidas de tensão excessivas no lado da rede, os conversores série absorvem a energia a mais existente, competindo aos elementos armazenadores de energia suportar este excedente (Monteiro, 2008). Em situações onde os dispositivos de armazenamento já estão totalmente carregados, provocará um aumento na tensão do *DC Link*. Esta situação é tanto mais evidente em montagens armazenadoras de energia baseadas em conversores fonte de tensão com condensadores de capacidades relativamente baixas, talvez por isso tão pouco encontradas em estudos.

O presente trabalho, que consistiu na implementação de um UPQC integrado com SMES, pretende contribuir com uma análise mais detalhada sobre o comportamento desta solução, pouco retratada na literatura, na compensação de alguns dos principais distúrbios que atingem a rede elétrica. Foi também implementado um método de controlo de sobretensões que retira partido das características da tecnologia SMES. Este método revelou-se bastante eficiente no controlo de sobretensões de várias magnitudes, e pela sua forma de atuar pode mitigar sobretensões de duração teoricamente infinita. Apesar de só ter sido testado em montagens baseadas em fonte de tensão, é de prever que também possa facilmente ser aplicado nas de fonte corrente.

1.4. Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos principais.

Neste primeiro capítulo é feita uma introdução sobre os temas abordados, incluindo-se os objetivos que se pretenderam alcançar.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica das temáticas estudadas. Aqui descrevem-se os principais problemas que afetam uma rede elétrica ao nível da distribuição, bem como algumas soluções que visam assegurar o cumprimento de padrões de qualidade de energia. Neste campo, os conversores ativos são a solução mais enfatizada, sendo descritas ao longo do capítulo as características e o funcionamento das suas principais configurações: série, paralela e unificada. É igualmente apresentada a importância que um elemento de armazenamento de energia desempenha na melhoria dos processos de compensação de perturbações, comparando-se a tecnologia SMES adotada, com diferentes soluções de armazenamento existentes. Nesta secção são ainda ilustradas diversas soluções de controlo e modelação utilizadas no comando dos vários componentes do sistema.

O dimensionamento dos elementos constituintes do SMES e dos conversores utilizados são abordados no capítulo 3, denominado por Dimensionamento e Implementação. Aqui são igualmente explicadas as várias funcionalidades do sistema e justificadas as opções tomadas. Apresenta-se ainda o sistema implementado para deteção dos distúrbios de forma automática.

No capítulo 4, ou Análise de Resultados, procede-se à apresentação e análise qualitativa dos resultados obtidos com o sistema implementado perante diferentes tipos de distúrbio e diferentes tipos de cargas.

No último capítulo (Conclusões e Trabalho Futuro) são apresentadas as conclusões retiradas do desenvolvimento deste trabalho, assim como indicadas algumas sugestões que podem ser desenvolvidas no futuro.

2. Revisão Bibliográfica

No presente capítulo são abordados os conteúdos teóricos fundamentais às temáticas desta dissertação. Aqui encontram-se caracterizados os principais problemas que afetam as redes elétricas de distribuição, bem como um estado de arte sobre as soluções mais referenciadas, tendo como maior foco os conversores ativos.

2.1. Problemas na Rede Elétrica

Melhorar a qualidade da energia elétrica é o principal mote da presente dissertação. Esta temática é determinante não só para assegurar o bom funcionamento do setor industrial, garantindo bons níveis de competitividade às empresas, como é sinónimo de menores impactos para o ambiente.

Se à saída das grandes centrais conversoras de energia elétrica a QEE é por norma muito boa, até chegar aos locais de consumo uma série de agentes perturbadores conduzem à sua degradação. Estas perturbações podem ter origens tanto no lado do fornecimento como no lado do cliente. As primeiras por norma devem-se a fenómenos naturais, defeitos do próprio material ou até acidentes decorrentes de obras, já as segundas são causadas pela não linearidade das cargas constituídas por elementos de eletrónica de potência (EDP, 2005).

Como a generalidade das cargas ditas “poluidoras” se encontra ligada à rede de média e baixa tensão, é na distribuição que o conceito de qualidade de energia ganha mais expressão, sendo os problemas mais comuns harmónicas, subtensões e sobretensões² (Teke, 2011). Embora tenham uma ocorrência muito menos frequente (ver Figura 2.1), muitas vezes são também destacadas na literatura as situações mais graves de cavas, ou seja, as interrupções. Na Figura 2.2 são mostrados exemplos de formas de onda que caracterizam cada um destes fenómenos.

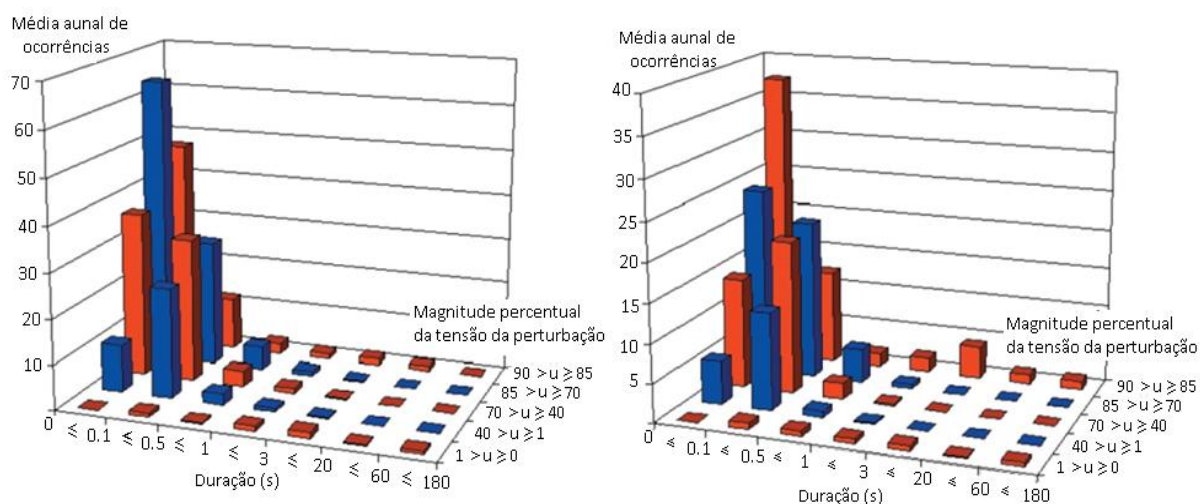


Figura 2.1: Características das subtensões registadas em linhas aéreas (à esquerda) e subterrâneas (à direita) de média tensão, entre os anos de 1996 e 1998 (EDP, 2005).

² Na literatura muitas vezes as subtensões e sobretensões, quando inferiores a 1 minuto, são designadas pelos seus termos ingleses *sag* e *swell*, respetivamente. Nesta dissertação, são utilizados os termos cava e subtensão para fazer referência a abaixamentos de tensão na sua generalidade, isto é, independentemente da sua duração ou magnitude. Da mesma forma que será utilizado o termo sobretensão para a situação inversa.

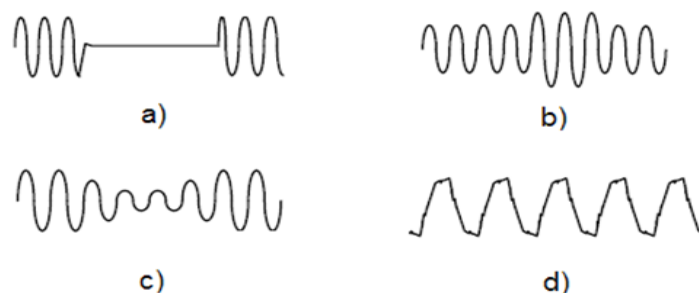


Figura 2.2: Distúrbios na QEE: a) interrupção, b) sobretensão, c) subtensão e d) harmônicas.

Uma classificação mais detalhada dos quatro distúrbios antes mencionados, em termos de magnitude e duração das suas ocorrências, pode ser consultada na Tabela 2.1, assim como de outras perturbações também existentes.

Tabela 2.1: Classificação dos problemas de QEE na tensão segundo a norma IEEE 1559-1995.

Categorias		Duração Típica	Amplitude Típica
Transitórios	Impulsos	ns até ms	-
	Oscilações	3μ até 5 ms	0 a 8 p.u.
Variações de curta duração	Instantâneas	Subtensão	0.1 a 0.9 p.u.
		Sobretensão	1.1 a 1.8 p.u.
	Momentâneas	Interrupção	0.5 ciclos a 3s
		Subtensão	até 0.1 p.u.
		Sobretensão	0.1 a 0.9 p.u.
	Temporárias	30 ciclos a 3s	1.1 a 1.4 p.u.
		Interrupção	até 0.1 p.u.
		Subtensão	0.1 a 0.9 p.u.
		Sobretensão	1.1 a 1.4 p.u.
Variações de longa duração	Interrupção	acima de 1min	-
	Subtensão		0.8 a 0.9 p.u.
	Sobretensão		1.1 a 1.2 p.u.
Desequilíbrios de tensão		Permanente	0.5 a 2 %
Distorção da forma de onda	Offset DC	Permanente	0 a 0.1 %
	Harmônicas		0 a 20 %
	Interharmônicos		0 a 2 %
	Notching		-
	Ruído		0 a 1 %
Flutuações de Tensão		Intermitente	0.1 a 7 %
Variações de Frequência		10s	-

As consequências associadas às quedas de tensão vão desde o mau funcionamento do equipamento, com diminuição do rendimento, perdas de dados e erros de processamento, ou nos casos mais graves interrupção total do seu funcionamento. Já as situações de tensão excessiva podem igualmente levar a perdas de dados em sistemas informáticos, bem como desgaste dos isolamentos ou até destruição de componentes eletrónicos. Problemas de sobreaquecimento, erros na obtenção de valores em aparelhos de medição, ressonâncias, degradação do fator potência e correntes excessivas no neutro, estão entre as causas mais comuns da presença de conteúdo harmónico (EDP, 2005; Seymour, 2005).

No capítulo introdutório já se salientou que o nível de prejuízos económicos que podem advir de uma baixa qualidade energética são enormes. Por forma a assegurar um bom nível de QEE, vários organismos têm definido normas que obrigam redes e equipamentos a funcionar de acordo com determinados parâmetros estipulados. Neste campo o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e a *International Electrotechnical Commission* (IEC) são os organismos de maior relevo a nível mundial.

Na Europa a norma padrão é a EN 50160. Esta norma, definida pelo Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica (CENELEC), pode ter pequenas variações de país para país, como no caso de Portugal onde a utilizada é a NP EN 50160 (EDP, 2005). Um exemplo de regulamentação europeia pode ser encontrado no Anexo 1, neste caso para delimitar o conteúdo harmónico de tensão em redes BT.

As normas IEEE são mais focadas no mercado norte-americano, no entanto, como possuem uma estruturação mais simples e mais prática que as definidas pela IEC, são muitas vezes utilizadas como referência de documentos de todo o mundo. As suas normas mais usuais no que toca a conteúdo harmónico podem ser consultadas no Anexo 2.

2.2. Soluções para Mitigar Problemas na Rede Elétrica

De seguida irão ser apresentadas algumas das soluções mais comuns desenvolvidas nas últimas décadas para mitigar os principais problemas que afetam a qualidade da energia nas redes elétricas de distribuição.

2.2.1. Filtros Passivos

A utilização de filtros passivos (FP) é a forma mais clássica de atenuar harmónicas. Trata-se de uma solução barata, robusta e de fácil dimensionamento. Mas em contrapartida possuem pouca flexibilidade, isto é, são projetados para filtrar apenas um determinado espectro harmónico, e no caso de não estarem devidamente ajustados podem originar ressonâncias indesejadas (Pires, 2010). O seu nome advém do facto de serem construídos apenas por componentes passivos: condensadores (C), bobinas (L) e resistências (R). Consoante a banda de frequência que atenuam, podem ser classificados por:

- Passa-Baixo.
- Passa-Alto.
- Passa-Banda.
- Corta-Banda.

A colocação dos FP pode ser feita em série ou em paralelo com a rede elétrica. No entanto em aplicações de potência são as configurações em paralelo as mais utilizadas, pois ao contrário do que sucede nas topologias série, estas não precisam de suportar toda a corrente, apenas aquela para a qual estão dimensionadas. Isto permite utilizar componentes mais baratos e de menores dimensões (Pires, 2010; Rashid, 2011).

A grande utilização de filtros passivos série encontrada na literatura prende-se sobretudo com a atenuação de harmónicas de sinais provenientes de inversores comutados com sinais modulados por largura de pulso. Nestas situações é muitas vezes aplicado um filtro passa-baixo LC (Figura 2.3) de modo a filtrar as harmónicas de mais elevada frequência.

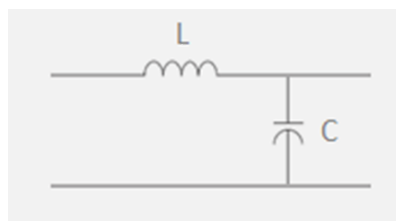


Figura 2.3: Filtro passa-baixo LC.

A frequência de corte, f_n , deste tipo de filtro é dada pela equação (2.1), com o índice n a representar a ordem harmónica que se pretende filtrar. No seu dimensionamento há que ter em conta que a frequência de corte deve ser muito inferior à frequência de comutação dos semicondutores do inversor e muito superior à frequência das tensões do lado AC (Costa, 2007).

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.1)$$

Relativamente à topologia paralela, esta pode ser dividida em filtros sintonizados e filtros amortecidos. Os filtros sintonizados são concebidos para a filtragem de frequências específicas. Nessa frequência para a qual são sincronizados apresentam uma impedância mínima, fazendo com que as componentes harmónicas circulem por ele e não pela rede. Na Figura 2.4 é apresentada a configuração mais comum deste tipo de filtro, cuja frequência de corte, f_n , é definida, e à semelhança da topologia série apresentada em cima, por (2.1). Para efeitos de dimensionamento f_n deve ser 5% abaixo da frequência pretendida, devido à dinâmica não ideal dos seus componentes (Rashid, 2011).

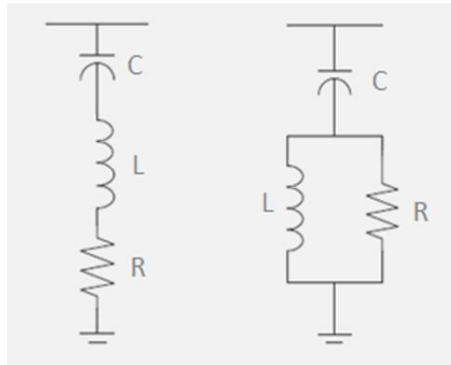


Figura 2.4: Filtro sincronizado de frequência única (à esquerda) e amortecido de segunda ordem (à direita).

Uma outra característica dos filtros sintonizados é o fator de qualidade, Q . Este deve estar compreendido entre 50 e 150 (Rashid, 2011), sendo calculado por:

$$Q = \sqrt{\frac{L}{CR^2}} \quad (2.2)$$

Os filtros amortecidos, por seu lado, não se limitam a atenuar uma frequência específica, abrangendo uma maior largura de banda. Por norma os filtros sincronizados são aplicados na atenuação das harmónicas de maior amplitude e mais baixa frequência (até ordem 11), sendo os filtros amortecidos utilizados para as de maior frequência. O seu fator de qualidade é dado pelo inverso da equação (2.2) estando normalmente compreendido entre 0,5 e 1,5 (Rashid, 2011). Na Figura 2.4 é possível observar uma topologia de segunda ordem, bastante mais usual para estes filtros, dado que a de primeira ordem requer um condensador de capacidade relativamente elevada e não garante um nível de filtragem tão eficiente. Estas e outras configurações de filtros passivos podem ser vistas com maior detalhe em (Santos, 2011).

2.2.2. Filtros Ativos

Com o intuito de ultrapassar as limitações dos filtros passivos, Akagi desenvolveu durante a década de 80 os filtros ativos (FA). Baseados na conjugação de componentes passivos com dispositivos semicondutores e algoritmos de controlo, os filtros ativos são uma tecnologia muito mais flexível e universal que os FP (Pires, 2010). Estas características permitem a filtragem de harmónicas independentemente do tipo de carga, sendo apenas limitada pela potência do próprio filtro.

Desde a sua criação muitas configurações têm sido desenvolvidas, hoje em dia podem ser encontradas três topologias principais de FA:

- Filtros Ativos Série (FAS).
- Filtros Ativos Paralelo (FAP), também designados por filtros ativos *shunt*.
- Filtros Unificados.

Muitas vezes a estas configurações são acoplados filtros passivos a fim de melhorar o seu desempenho global. Cada uma das três topologias será analisada com maior rigor ao longo das subsecções seguintes.

2.2.2.1. Condicionadores Série

Nesta subsecção é abordada a compensação em série por meio de sistemas de compensação ativa. Estes sistemas têm como principal função resolver os problemas ao nível das tensões do sistema antes apresentados. Seguidamente será explicado com maior detalhe o funcionamento da topologia tipo do FAS, bem como o funcionamento de outra configuração mais usual nos dias de hoje, o *Dynamic Voltage Restorer*.

⇒ Filtro Ativo Série

O filtro ativo série (Figura 2.5) funciona como uma fonte de tensão controlada, cujo principal objetivo é mitigar os desequilíbrios e distorções harmónicas da tensão fornecida pela rede elétrica. O seu funcionamento é resumido pela equação (2.3), e assenta em fornecer (ou retirar) uma tensão, v_C , no condensador, que somada à tensão da rede (v_s) origina uma tensão sinusoidal na carga (v_L).

$$v_L = v_s + v_C \quad (2.3)$$

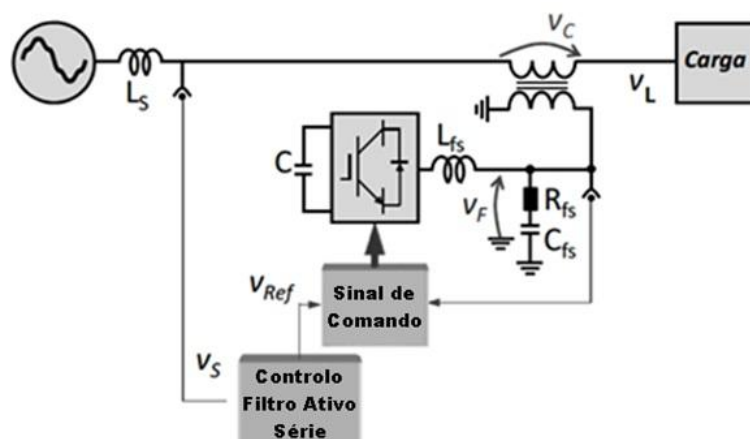


Figura 2.5: Diagrama unifilar de um filtro ativo série típico com VSI. Adaptado de (Monteiro, 2008).

Contudo este tipo de filtro é muito pouco utilizado, uma vez que na sua forma de funcionamento típica não está dotado de um algoritmo capaz de manter a tensão na carga em situações de variações momentâneas, limitando-se essencialmente à compensação de harmónicas de tensão (Monteiro, 2008). No entanto este fenómeno tem uma ocorrência muito inferior às harmónicas de

corrente, tendo também por norma uma amplitude muito reduzida, o que não afeta o funcionamento da generalidade dos sistemas (Pregitzer, 2006).

⇒ *Dynamic Voltage Restorer*

Uma evolução do conversor FAS surgiu na década de 90. Com o nome de *Dynamic Voltage Restorer* (DVR), este conversor, apresentado na Figura 2.6, tem como principais funções mitigar as cavas e as sobretensões de curta duração. Pode ainda reduzir alguns efeitos de harmónicas de tensão e de transitórios (Monteiro, 2008; Galassi, 2006).

O seu princípio de funcionamento é similar ao FAS, pelo que também é regido pela equação (2.3). Contudo, além de ser controlado de forma diferente, o *Dynamic Voltage Restorer* possui no lado DC um elemento com maior capacidade de armazenamento de energia (AE). Segundo (Jesus & Samesima, 2007) a adição de um elemento armazenador é fulcral para melhorar o desempenho do compensador série. O que possibilita deste modo que o *DC Link* seja capaz de suprimir desníveis energéticos causados por cavas, limitado claro está pela quantidade de energia existente, bem como uma maior capacidade para armazenar as quantidades de energia em excesso aquando da ocorrências de sobretensões. Neste campo, várias são as tecnologias existentes, e que podem ir da simples adição de bancos de condensadores maiores até a soluções mais modernas. A escolha da tecnologia de armazenamento utilizada será discutida com maior detalhe na subsecção *Armazenamento de Energia Elétrica*.

Para além do sistema AE é possível aferir pela Figura 2.6, que o DVR é também constituído por:

- Transformador.
- Conversor de Potência e Filtro Passivo.
- Sistemas de Controlo.

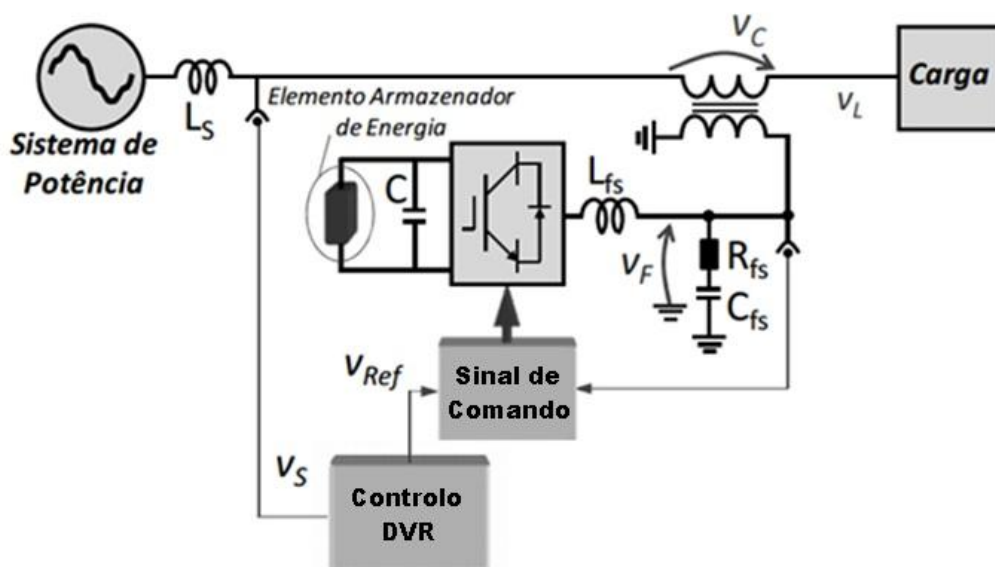


Figura 2.6: Esquema unifilar típico de um DVR com VSI. Adaptado de (Monteiro, 2008).

De seguida serão descritos os elementos constituintes do DVR.

Transformador

O transformador é o elemento que permite que sejam injetadas as tensões de compensação em série com a rede elétrica. Para isso, o lado primário é ligado em série com a rede, enquanto o secundário é ligado ao DVR. Além de proporcionarem um isolamento galvânico, os transformadores possibilitam aproximar a tensão utilizada na supressão de distúrbios com a tensão do lado DC, o que permite uma melhor sintetização da onda de compensação (Monteiro, 2008).

Nestes conversores os transformadores utilizados podem ser trifásicos ou constituídos por três unidades monofásicas. No entanto a topologia constituída por transformadores monofásicos é a mais usual nos DVR, pois permite que se possam compensar cavas e sobretensões, tanto monofásicas como trifásicas.

Conversor de Potência e Filtro Passivo

Durante as compensações de subtensões é absorvida a energia do sistema de armazenamento sob a forma contínua e injetada na rede sob a forma alternada, ou o processo inverso no caso de sobretensões. Estas passagens entre lado contínuo e alternado são feitas pelo conversor de potência. Na Figura 2.6 o lado contínuo é representado por uma unidade de armazenamento de energia e um condensador. Contudo a existência de condensador depende da topologia adotada para fazer a conversão da potência. Na secção 2.3.3.2., dedicada a sistemas de condicionamento de potência, é apresentada uma outra topologia sem condensador.

Os filtros passivos são adicionados para filtrar as harmónicas de maior ordem resultantes do processo de conversão. De modo a baixar a tensão sobre o transformador por norma colocam-se os FP junto à fonte geradora de harmónicas, ou seja, na saída do conversor (Deshmukh & Dewani, 2012).

Da descrição do transformador ficou patente que é mais vantajosa a utilização de elementos monofásicos do que um trifásico. Neste seguimento, várias topologias de conversores monofásicos podem ser encontradas na literatura. Em (Variath et al., 2010) é feita uma análise detalhada de várias configurações inversoras, em termos de rendimento, distorção harmónica total (ou THD³) e consumo em *stand-by*. Onde a topologia *Full H-Bridge* é a que melhor estabelece um compromisso entre rendimento e THD.

No seu modo de funcionamento a *Full H-Bridge* possibilita que se possa desabilitar o DVR, evitando que potências indesejadas sejam inseridas na rede, tal como será explicado na secção 3.3.2. Também em (Pregitzer, 2006) é defendida a mais-valia de se utilizar os três inversores

³ Acrónimo do seu nome em inglês – *Total Harmonic Distortion*.

monofásicos independentes em configuração *Full H-Bridge* para implementação do condicionador série, resultando na solução apresentada na Figura 2.7.

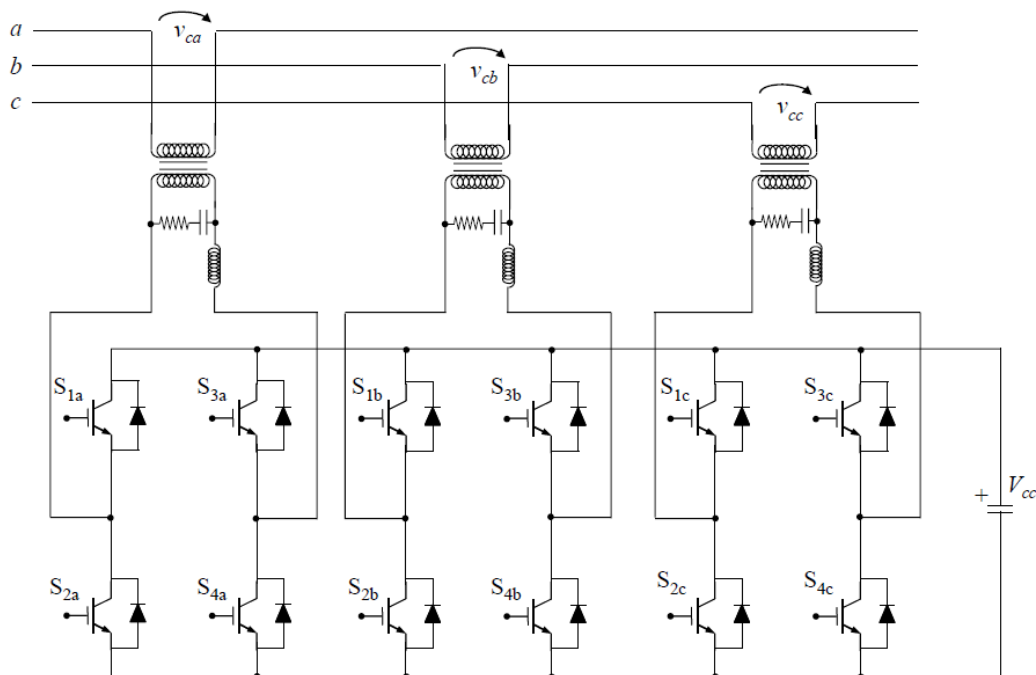


Figura 2.7: Conversor trifásico constituído por três transformadores monofásicos independentes com inversor em configuração *full h-bridge* (Pregitzer, 2006).

Sistema de Controlo

Cabe ao sistema de controlo gerir o funcionamento do sistema. Na Figura 2.6 estão igualmente representadas as duas tarefas principais associadas a esta unidade: a geração de tensões de referência e geração de sinais de comando do conversor. Em que a geração de tensões de referência é a responsável por calcular o sinal de compensação a enviar ao conversor, enquanto a segunda tarefa se incumbe pela modelação deste mesmo sinal.

Mais à frente nesta subsecção são descritas técnicas para calcular as tensões de referência, sendo as técnicas de modulação apresentadas no subcapítulo 2.4. Também será visto nesta dissertação (capítulo 3), que é a partir de sinais provenientes do sistema de controlo do DVR que é construído o algoritmo utilizado na deteção de cavas.

> Topologias DVR

A manutenção da energia no lado DC do DVR é essencial para que com maior eficiência se compensem cavas e sobretensões, sendo para isso usual a adição de um retificador. Diversas topologias deste sistema podem ser vistas na literatura (ver (Teke, 2011)), nomeadamente as configurações onde a energia é extraída do lado da rede e onde é extraída do lado da carga.

Na primeira configuração (Figura 2.8) como o retificador que alimenta o *DC Link* está diretamente ligado à rede, no caso de ocorrência de cavas ou sobretensões, a tensão no lado contínuo sofrerá uma variação proporcional à perturbação da rede, obrigando o *DC Link* a drenar mais energia para compensar o distúrbio (Galassi, 2006; Jesus & Samesima, 2007). Tal situação pode levar a que a tensão no condensador se torne inferior ao valor mínimo que assegura o funcionamento controlado dos conversores, potenciando que o DVR possa fornecer correntes assimétricas e distorcidas.

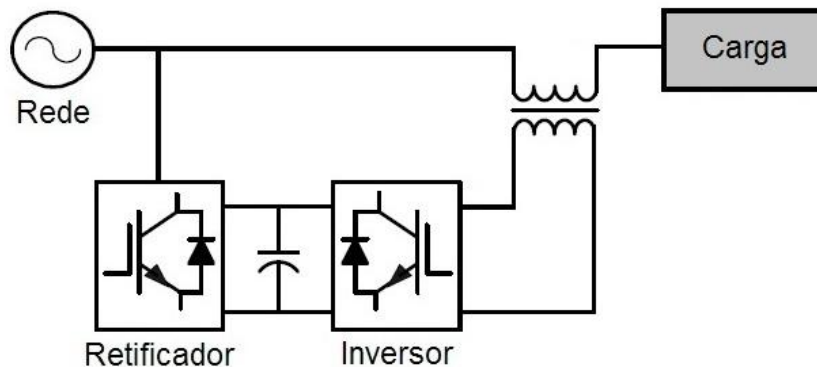


Figura 2.8: Topologia de DVR com energia extraída do lado da rede.

Já na configuração presente na Figura 2.9, quando a energia é extraída do lado da carga significa que o inversor já atuou no sentido de restaurar as perturbações da rede, tornando a tensão de entrada do retificador praticamente igual à tensão dos terminais da carga. Este modo de atuação permite que durante os distúrbios seja drenada menos energia que na situação anterior, o que torna a tensão no *DC Link* mais constante e controlável (Jesus & Samesima, 2007).

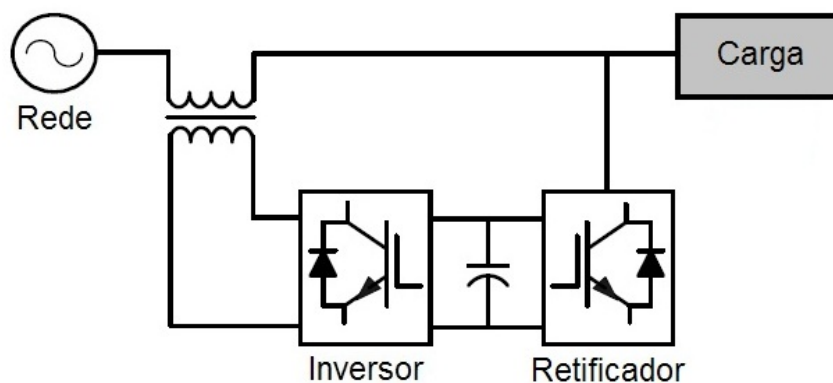


Figura 2.9: Topologia de DVR com energia extraída do lado da carga.

Pelas características mencionadas, a segunda topologia é a que melhor desempenho apresenta na compensação de cavas e sobretensões. Contudo, em (Jesus & Samesima, 2007) é também referido que das duas configurações esta é a mais cara, sendo simultaneamente a que gera maiores distorções harmônicas na tensão. Por ambas apresentarem vantagens e desvantagens, a configuração a adotar deve ser a que melhor se adequa à finalidade pretendida para o sistema.

> Técnicas Para Calcular as Tensões de Referência no DVR

Para que o DVR possa mitigar as cavas e sobretensões eficazmente, é primeiro que tudo necessário calcular o sinal de compensação a enviar ao conversor. Na literatura é extenso o número de técnicas destinadas a este fim, podendo-se agrupá-las em dois conjuntos principais, as de controlo linear e as de controlo não linear.

Estas últimas apesar de mais complexas que as técnicas lineares, apresentam-se como mais eficientes para controlar sistemas com maiores níveis de instabilidade. Neste campo as principais estratégias existentes baseiam-se em algoritmos de redes neuronais artificiais e lógica difusa. Em relação às técnicas de controlo lineares estes métodos permitem mais precisão, menores picos transitórios e melhores desempenhos em baixas frequências de comutação (Sharanya, Basavaraja, & Sasikala, 2012).

Contudo, as técnicas de controlo baseadas em métodos lineares são as mais usuais nos compensadores série. O seu controlo assenta sobretudo na comparação de sinais da rede com sinais de referência, sendo o sinal de erro daí resultante o utilizado na modelação dos sinais de comando do conversor.

São três os principais métodos de controlo linear presentes na literatura (Pakharia & Gupta, 2012; Sharanya et al., 2012):

- Controlo *feedforward*.
- Controlo *feedback*.
- Controlo composto.

O controlo *feedforward* é um método muito simples e extremamente rápido, onde o sinal de compensação resulta da comparação da tensão da rede com um sinal de referência. Já o método de controlo *feedback*, utiliza a tensão na carga e sinais de referência no cálculo do sinal de comando. Este modo de funcionamento do segundo método permite que se obtenha um menor erro estático que no controlo *feedforward*, contudo os seus tempos de resposta são maiores. No controlo composto são utilizadas duas malhas de controlo simultaneamente, uma dedicada ao controlo da tensão na rede em *feedforward* e outra em *feedback* utilizada no controlo da corrente na carga, sendo por isso o método que garante mais estabilidade ao sistema. No entanto torna-se simultaneamente o mais complexo e o que apresenta tempos de resposta maiores.

Pela simplicidade de implementação e pela sua grande capacidade de criar sinais de referência adaptados à frequência da rede, decidiu-se utilizar neste trabalho um método de controlo *feedforward* baseado na utilização de um circuito *Phase-Locked Loop* (PLL), bastante similar com o descrito em (Nogueira, 2010).

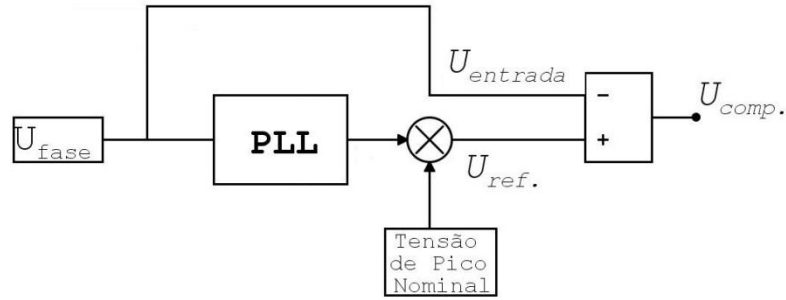


Figura 2.10: Diagrama do método de controlo *feedforward* baseado na utilização de um circuito PLL.

O circuito PLL gera na sua saída um sinal sinusoidal com a mesma frequência e fase do sinal de entrada. Assim, calibrando-se este mesmo sinal para a amplitude da tensão da rede em funcionamento nominal é possível obter-se, por comparação com a tensão da própria rede, o sinal de compensação a enviar ao inversor. A representação esquemática deste processo é apresentada na Figura 2.10.

Uma limitação que se pode intuitivamente atribuir a este método, surgiria em situações de ocorrência de oscilações na frequência da rede elétrica. Com esta topologia a tensão de referência da carga teria uma variação igual à da rede. No entanto, nas redes elétricas fortemente interligadas, como sucede com a rede elétrica nacional, as variações de frequência são praticamente insignificantes (EDP, 2005). Deste modo, tal limitação pode ser desprezada.

Com este método é também possível saber-se exatamente onde começam e quando acabam os distúrbios ocorridos ao nível da tensão, bem como a magnitude dos mesmos. Esta rapidez e precisão da informação obtida foi crucial para o desenvolvimento dos algoritmos de deteção de cavas e interrupções utilizados (secção 3.4).

2.2.2.2. Filtro Ativo Paralelo

Se idealmente os condicionadores série operam como fontes de tensão controlada, os condicionadores paralelos por seu lado funcionam como fontes de corrente. Neste campo os filtros ativos paralelos são a tecnologia mais destacada na literatura para solucionar distúrbios relacionados com as correntes de um determinado sistema, nomeadamente no que respeita à mitigação de harmónicas.

As correntes harmónicas produzidas por cargas não lineares (i_L) são anuladas através da injeção de correntes de compensação (i_F) produzidas no FAP, de modo a que as correntes na fonte (i_S) se tornem sinusóides equilibradas e com fator de potência unitário, estando este último dependente do método de controlo adotado (Pregitzer, 2006). No caso de cargas puramente resistivas o FAP praticamente não injeta corrente, com a exceção de valores mínimos utilizados para compensar perdas (Modesto, 2007).

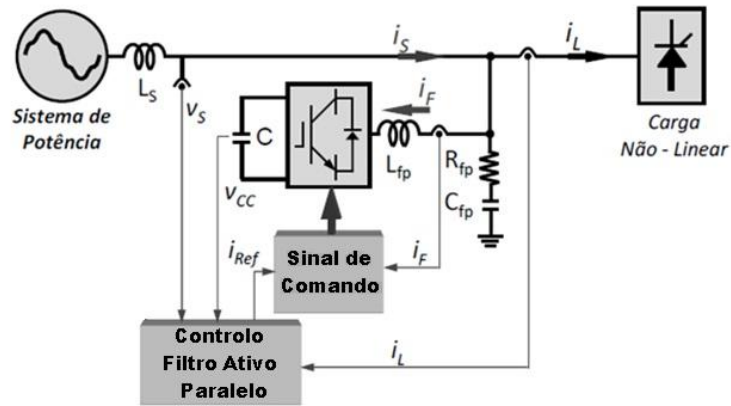


Figura 2.11: Esquema unifilar típico de um Filtro Ativo Paralelo com VSI. Adaptado de (Monteiro, 2008).

Uma configuração típica de um filtro ativo paralelo é apresentada na Figura 2.11, estando o seu princípio de funcionamento, que é dado pela equação (2.4), ilustrado na Figura 2.12.

$$i_s = i_F + i_L \quad (2.4)$$

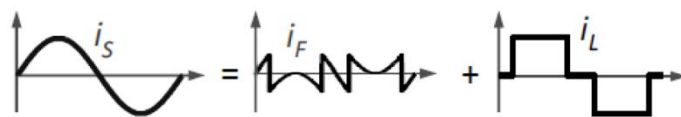


Figura 2.12: Princípio de funcionamento do FAP. Adaptado de (Monteiro, 2008).

Analisando com maior rigor a Figura 2.11, é possível observar que na sua estrutura típica o filtro ativo paralelo é constituído por dois tipos de unidades principais:

- Inversor e Filtros Passivos.
- Sistemas de Controlo.

O filtro ativo paralelo injeta correntes de compensação para atenuar os distúrbios na corrente do sistema. À semelhança do que sucede com o filtro ativo série, no FAP a energia utilizada para criar as correntes de compensação é colocada numa unidade que armazena energia na forma contínua, sendo o inversor o elemento que fará a passagem para a forma alternada. Também aqui a existência do condensador dependerá da topologia escolhida para o *DC Link*.

Apesar de não ser obrigatório, na maioria das ocasiões é a própria rede onde estão colocados os filtros ativos que faz o carregamento do sistema de armazenamento de energia. Para isso é necessário dotar o sistema também de um elemento retificador, ou em vez disso comanda-se o inversor de modo a atuar como conversor bidirecional. Pois, na topologia mais usual, a trifásica de seis pulsos (Figura 2.13), tanto retificador como inversor, são constituídos pelos mesmos dispositivos.

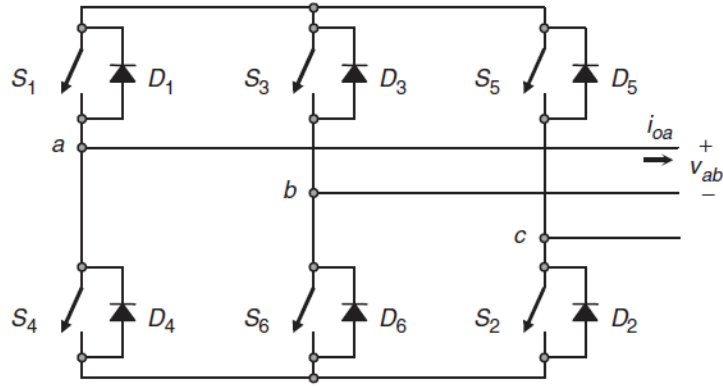


Figura 2.13: Conversor trifásico de seis pulsos.

Os restantes elementos dos FAP, filtros e passivos e sistemas de controlo, possuem funções similares às dos seus elementos homólogos existentes no filtro série, pelo que a sua descrição já foi efetuada na subsecção 2.2.2.1. Já as técnicas utilizadas na geração de referências de sinais de compensação diferem das utilizadas no DVR. Tal como antes avançado, as harmónicas de tensão não prejudicam o funcionamento da generalidade dos sistemas, adicionalmente, a ocorrência deste tipo de harmónicas é pouco frequente, sendo muitas vezes até consequência direta da existência de harmónicas de corrente (Schneider, 2003). Já estas últimas são cada vez mais usuais nas redes eléctricas, contribuindo com elevados conteúdos harmónicos e consequente aumento de potência reativa, pelo que se torna fundamental que as técnicas de comando dos FAP consigam compensar este teor reativo.

> **Técnicas para Calcular as Tensões de Referência nos FAP**

Na literatura são várias as técnicas utilizadas para calcular os sinais de referência utilizados no comando dos FAP, e que possibilitam que sejam injetados sinais capazes de compensar harmónicas. Dessas técnicas as duas mais destacadas são:

- Teoria da Potência Reativa Instantânea (Rashid, 2011; Modesto, 2007; Pregitzer, 2006);
- Método dos Eixos de Referência Síncrona (Rashid, 2011; Modesto, 2007);

>> **Teoria da Potência Reativa Instantânea**

Proposta por Akagi, esta técnica também designada por teoria $p-q$, é a forma mais popular de controlo de filtros paralelos. O seu funcionamento tem por base a mudança das coordenadas do sistema $a-b-c$, para o sistema bifásico estacionário $\alpha-\beta-0$, tanto da tensão da rede como da corrente da carga, através das transformações de Clarke respetivas, (2.5) e (2.6).

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Já em coordenadas bifásicas são calculadas as potências ativa (p) e reativa (q) por:

$$p = v_{\alpha}i_{\alpha} + v_{\beta}i_{\beta} \quad (2.7)$$

$$q = v_{\beta}i_{\alpha} - v_{\alpha}i_{\beta} \quad (2.8)$$

As potências p e q , possuem tanto um componente DC, como elementos AC representativos do conteúdo harmónico. O volume de conteúdo harmónico a ser eliminado é obtido pela filtragem de cada uma das potências calculadas.

Finalmente são obtidas as correntes de referência no seu formato bifásico ($i_{\alpha}^*, i_{\beta}^*$), através de:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_L \\ (\bar{q}_L + \tilde{q}_L) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

em que \tilde{p}_L , \tilde{q}_L e \bar{q}_L , representam respetivamente, o conteúdo harmónico da potência ativa, conteúdo harmónico da potência reativa e potência média reativa na frequência fundamental. As correntes para serem utilizadas na rede trifásica é necessária a sua passagem para o formato $a-b-c$, através de equações inversas às transformações de Clarke.

Todo este processo encontra-se mais detalhadamente explicado nas fontes em cima mencionadas, estando na Figura 2.14 um diagrama ilustrativo do seu funcionamento.

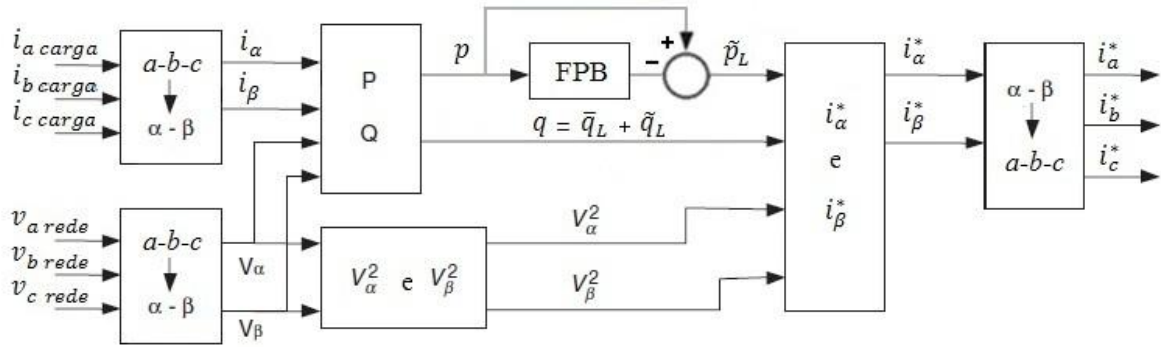


Figura 2.14: Diagrama de funcionamento da Teoria $p-q$.

Porém apesar de muito utilizada, a teoria $p-q$ apresenta a desvantagem das correntes de compensação serem extraídas a partir do cálculo das potências. Este facto impede que funcione corretamente em tensões desequilibradas.

>> Método dos Eixos de Referência Síncrona

Tal como o seu nome sugere, o Método dos Eixos de Referência Síncrona, ou SRF⁴, é caracterizado por fazer uma transformação de coordenadas *a-b-c* para a forma de eixos bifásicos síncronos e girantes, direto e quadratura, ou simplesmente eixos *dq*. Neste caso é a corrente de carga que sofre a transformação do formato *a-b-c* para *d-q-0*, sendo sincronizada para girar à mesma frequência da rede elétrica. Para esta transformação é necessário passar primeiro para o formato bifásico estacionário, ou seja, aplicar a transformada de Clarke, equação (2.6), e só depois fazer a passagem para o formato girante, através da transformada de Park, equação (2.10).

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Na equação imediatamente antes, ωt é o ângulo que representa a posição angular do sistema de eixos de referência síncrona. Sendo $\cos(\omega t)$ e $\sin(\omega t)$ as coordenadas polares do vetor unitário que se encontra sincronizado com a tensão da rede. Este sincronismo é feito utilizando um circuito PLL.

À semelhança do que acontece com as coordenadas estacionárias da teoria *p-q*, as coordenadas girantes são compostas por um componente contínuo fundamental, e por componentes alternados que expressam o conteúdo harmónico. Também aqui, através de uma filtragem passa-baixo é possível fazer-se a separação entre o componente fundamental e o conteúdo “poluído”, obtendo-se as coordenadas de referência no formato *dq*, ou seja, i_d^* e i_q^* . Posteriormente, aplica-se as equações inversas às transformadas de Park e Clarke de forma a obterem-se as correntes de referência na forma *a-b-c*, ou seja i_a^* , i_b^* e i_c^* .

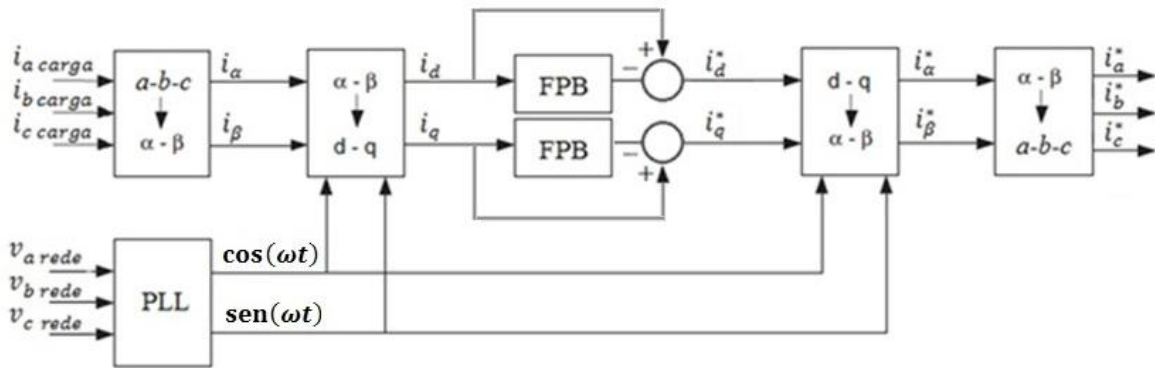


Figura 2.15: Diagrama de funcionamento do método SRF.

A Figura 2.15 ilustra o processo de funcionamento do SRF. Este método contrariamente ao que sucede com a teoria *p-q*, não depende da forma de onda da tensão, o que lhe permite operar normalmente mesmo sob tensões desequilibradas, tal como se comprova por uma simulação

⁴ Vem do inglês de *Synchronous Reference Frame*.

efetuada e apresentada na Figura 2.16. Este melhor desempenho levou a escolher este método para o filtro ativo paralelo implementado.

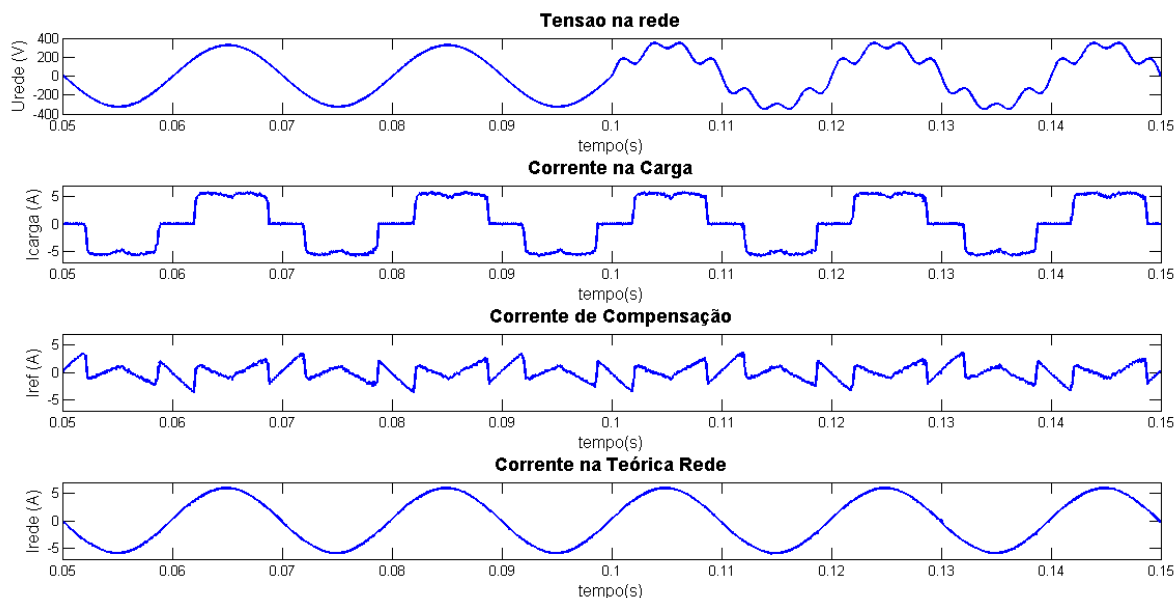


Figura 2.16: Simulação do cálculo das correntes de referência pelo método SRF sob tensões equilibradas e desequilibradas.

2.2.2.3. Filtros Ativos Unificados

A utilização de conversores *Dynamic Voltage Restorer* e conversores ativos paralelos permite melhorar a qualidade da energia elétrica, se os primeiros primam por atuar sobre distúrbios relacionados com a tensão, os FAP são utilizados para regular a corrente. Da junção destas duas topologias resulta o *Unified Power Quality Conditioner* (UPQC).

Com apenas uma aplicação comercial conhecida, desenvolvida pela empresa *Hykon India* (Boyra, 2012), esta tecnologia unificada consegue tirar partido simultaneamente das funcionalidades dos conversores série e paralelo (ver Tabela 1.2), conseguido desse modo atenuar muitas das perturbações que afetam as redes distribuição. Como principais exceções surgem problemas relacionados com transitórios rápidos e interrupções ou subtensões maiores, por parte da rede elétrica (Pregitzer, 2006; Han, et al., 2006; Moghadasi, et al., 2010).

Uma outra topologia unificada muito conhecida é a *Unified Power Flow Controller* (UPFC), cuja aplicação é mais direcionada para alguns dos problemas relacionados com sistemas de transporte de energia, que consistem principalmente no controlo do fluxo de potência e na regulação da tensão, desconsiderando-se assim, por exemplo, o problema das harmónicas (Boyra, 2012). Esta temática já não entra no plano de estudos desta dissertação, contudo mais informações podem ser encontradas na referência já citada neste parágrafo.

Na Figura 2.17 é apresentada uma das topologia mais usuais de UPQC, onde é possível constatar a presença dos condicionadores, série e paralelo, bem como o barramento DC entre os

dois dispositivos. Outras topologias podem ser encontradas em (Teke & Tümay, 2011; Nogueira, 2010).

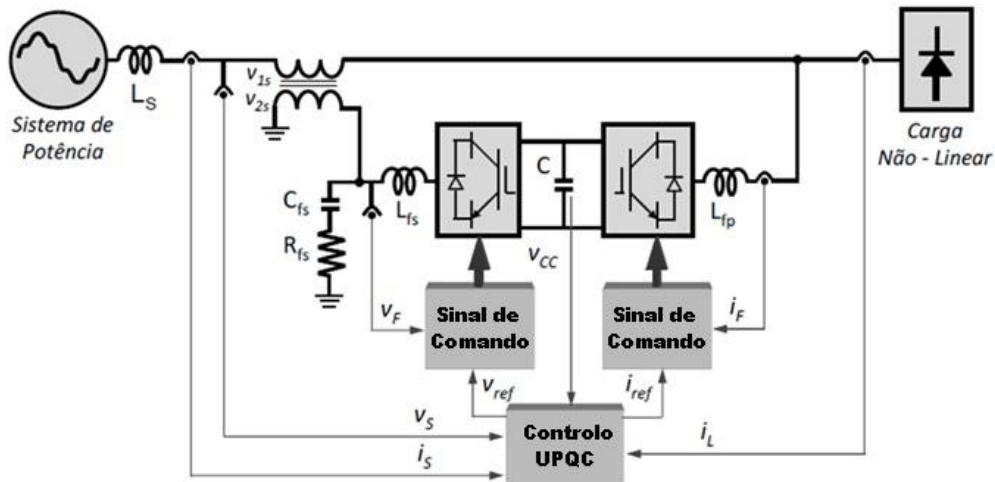


Figura 2.17: Esquema unifilar típico de um UPQC. Adaptado de (Monteiro, 2008).

O lado série do UPQC funciona de forma totalmente similar ao DVR, pelo que já foi descrito previamente. Já o filtro ativo paralelo, apesar de apresentar a mesma estrutura, possui uma tarefa adicional em relação ao apresentado na subsecção 2.2.2.2. Por ser mais fácil de controlar o seu conversor trifásico de seis pulsos e pelas vantagens de se utilizar uma topologia onde a energia é extraída do lado carga, ao invés de ser no lado da rede (ver Figura 2.8), o conversor ativo paralelo será adicionalmente responsável por regular a tensão no *DC link*. Para isto o FAP necessita de funcionar como um conversor bidirecional, ou seja, deve ter a capacidade de atuar como inversor e retificador (Figura 2.18). É a atuar como retificador que é reposta a energia no lado contínuo do sistema unificado, processo fulcral para assegurar a compensação dos vários distúrbios ao nível da tensão. Neste modo de atuar, segundo (Rashid, 2011), é possível fazer-se uma analogia do seu funcionamento com um conversor *boost*, onde a indutância de entrada funciona como uma fonte de corrente que permite aumentar a tensão na saída. Esta indutância tem ainda a finalidade de filtrar os componentes harmónicos de alta frequência produzidos durante as conversões.

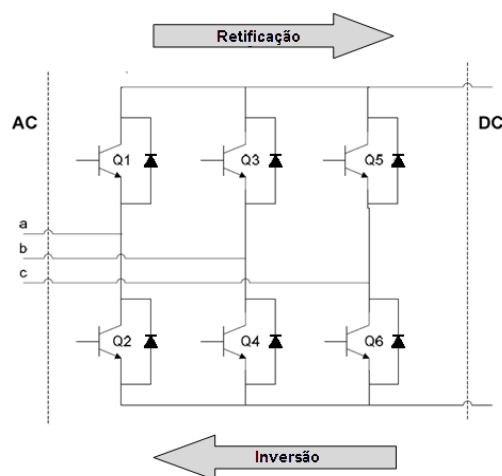


Figura 2.18: Conversor bidirecional AC/DC trifásico de seis pulsos.

De modo a poder regular a tensão no barramento DC também a estratégia de controlo SRF, já antes vista, terá que ser reajustada. Para que este controlo seja exequível, torna-se necessário considerar o erro (ΔV_{DC}) resultante entre o nível de tensão que se pretende no barramento e a tensão presente nesse momento. O novo diagrama do Método dos Eixos de Referência Síncrona encontra-se ilustrado na Figura 2.19.

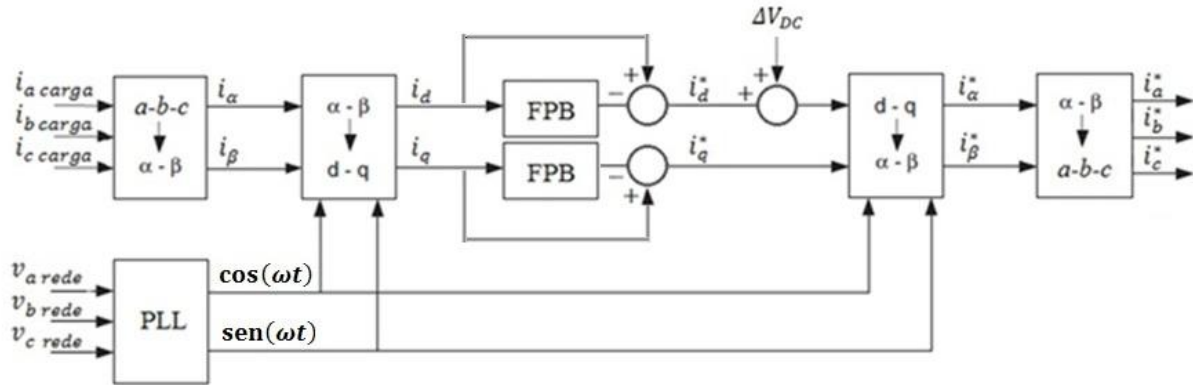


Figura 2.19: Diagrama de funcionamento do método SRF com controlo da tensão no lado DC.

2.3. Armazenamento de Energia Elétrica

Este subcapítulo dedica-se à análise da tecnologia de armazenamento a ser implementada conjuntamente com o conversor unificado. Primeiramente comparou-se a solução estudada com diferentes tecnologias de armazenamento existentes. Como a solução utilizada tem na sua gênese materiais supercondutores (SC), é também feita uma abordagem sucinta do tema da supercondutividade, indicando-se as principais propriedades e características dos seus materiais. Finda-se com uma análise mais detalha dos constituintes deste sistema.

2.3.1. Principais Tecnologias

Anteriormente já foi visto que para fazer face a subtensões torna-se necessário debitar energia na rede elétrica, tendo-se apontado as lacunas do UPQC. Para fazer a esta limitação energética em (Han, et al., 2006) é sugerido ligarem-se ao filtro unificado sistemas auxiliares de geração de distribuída (GD) de energia elétrica. Neste campo podem ser encontradas conjugações de UPQC com unidades de fotovoltaicas em (Cavalcanti, et al., 2006; Siah, et al., 2011), e ao nível eólico em (Hoseynpoor, et al.; Sajedi, et al., 2011). No entanto a utilização destas tecnologias dependentes de fontes renováveis padece de uma limitação inata, a produção de energia só acontece na presença do recurso natural.

No caso das energias renováveis, para fazer face à produção descontínua de energia, todos os sistemas GD devem ser dotados de unidades de armazenamento de energia. A adição de alguma capacidade de armazenamento garante uma pequena autonomia à central distribuída, o que permite que se diminuam as trocas energéticas entre ela e a rede elétrica, evitando assim problemas no fornecimento de potência decorrentes de uma produção irregular por parte das várias unidades renováveis que compõem a central distribuída (NIPE / UNICAMP, 2005).

Uma vez que a utilização de geradores distribuídos não se inclui no âmbito desta dissertação, daqui em diante apenas se fará referência às tecnologias de armazenamento de energia.

Como sistemas de armazenamento de energia têm-se por exemplo baterias, volantes de inércia e sistemas de ar comprimido. Contudo todas estas configurações apresentadas possuem uma característica comum, a energia não é armazenada na forma elétrica, obrigando a conversões. Com os SMES a conversão é puramente elétrica e já provou ser um bom complemento aos filtros unificados (Moghadasi et al., 2010; Kim et al., 2006). Esta característica possibilita que a bobina tenha tempos de vida muito elevados e rendimentos superiores a 90% nos seus processos de carga e descarga, o que supera em mais de 20% tecnologias típicas de armazenamento, e que envolvem transformação de energia (Buckles & Hassenzahl, 2000; Patel, et al., 2011).

Outra marca distintiva destes dispositivos é a sua grande capacidade de descarregar grandes quantidades de potência em curtos intervalos de tempo, como é dado a observar pela Figura 2.20, muito mais até que os supercondensadores, outra tecnologia de conversão puramente elétrica. Tais

características tornam os SMES bastante apelativos para suprimir as carências dos compensadores ativos na resolução de alguns dos mais comuns problemas da rede elétrica. A sua elevada densidade de potência é mesmo o aspeto mais valorizado na literatura. É graças a ele que a tecnologia consegue responder de forma rápida a carências energéticas, requisito indispensável para aplicações que visam melhorar a qualidade de energia elétrica (Ali, Wu, & Dougal, 2010; Denholm, Ela, Kirby, & Milligan, 2010), que é o objetivo principal desta dissertação.

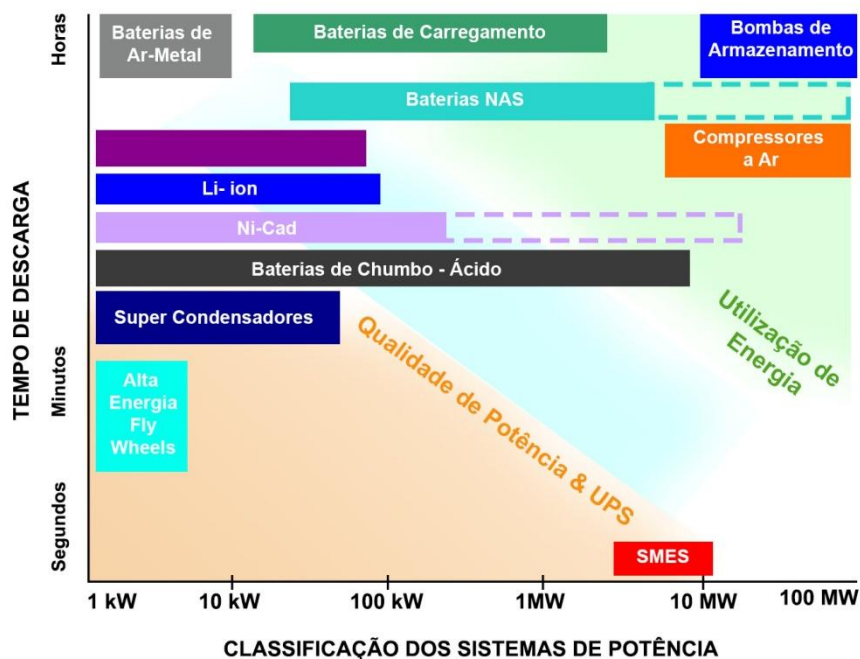


Figura 2.20: Comparação entre tecnologias de armazenamento de energia elétrica. Adaptado de (NIPE / UNICAMP, 2005)

2.3.2. Supercondutividade: Principais Propriedades e Tipos de Materiais

Corria o ano de 1911 quando o físico holandês Heike Kamerlingh Onnes ao estudar as propriedades das substâncias a temperaturas próximas do zero absoluto (0 K), verificou que a resistência elétrica de tubos capilares de mercúrio diminuía de forma abrupta aquando colocados abaixo de uma determinada temperatura, denominada por temperatura crítica. Estava assim descoberto um novo estado da matéria, que Onnes no seu discurso de entrega do prémio Nobel da física em 1913, designou por estado de supercondutividade (Onnes, 1913).

Na Figura 2.21 podem ser observados os resultados experimentais obtidos pelo físico holandês no seu laboratório em Leiden. Como se pode constatar, abaixo dos 4,2 K a resistência do mercúrio verifica uma diminuição para valores praticamente nulos.

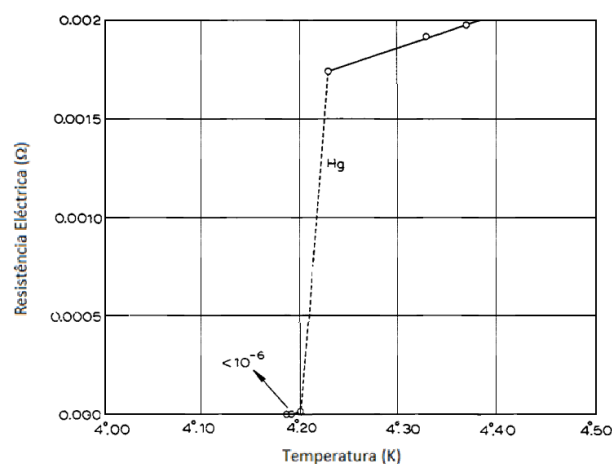


Figura 2.21: Comportamento da resistência elétrica do mercúrio de acordo com a temperatura (Onnes, 1913).

A ausência de resistência elétrica foi só a primeira propriedade associada aos materiais supercondutores. Além da temperatura crítica (T_C), existem mais duas propriedades verificadas por Onnes nos seus ensaios que caracterizam estes materiais: densidade de corrente crítica (J_C) e campo magnético crítico (H_C).

A densidade de corrente crítica traduz o valor máximo de corrente elétrica que um supercondutor pode transportar sem que passe ao estado normal. Esta grandeza é tanto maior quanto menor for a temperatura a que o supercondutor se encontre (Pronto, 2010).

A influência do campo magnético foi explicada anos mais tarde, em 1933, pelos físicos alemães Walther Meissner e Robert Ochsenfeld, ao verificarem que um supercondutor possui diamagnetismo perfeito. Ou seja, até um determinado valor de J_C e H_C consegue repelir o fluxo magnético do seu interior. Esta propriedade que recebeu o nome de efeito Meissner é de tal forma intensa que está na origem da levitação magnética com supercondutores (Branício, 2001). Até essa altura todos os materiais que possuíam a capacidade de a baixas temperaturas não apresentarem perdas de condução, eram designados por supercondutores. Com a descoberta do efeito Meissner o desígnio de material supercondutor mudou. Desde então passou-se a chamar de supercondutores apenas aos materiais que além de uma resistividade nula também possuem um diamagnetismo perfeito, sendo denominados por condutores perfeitos os que apenas possuem resistividade nula abaixo da temperatura crítica (Saunders & Ford, 2004).

As três grandezas físicas previamente apresentadas, T_C , J_C e H_C , em conjunto condicionam a supercondutividade, tal como ilustra o diagrama T-J-H apresentado na Figura 2.22.

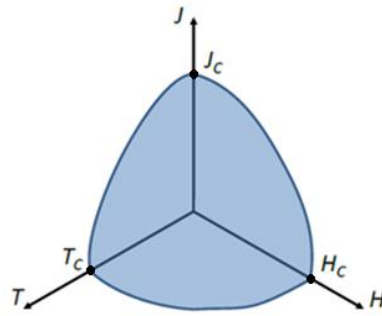


Figura 2.22: Diagrama T-J-H típico de um supercondutor (Pina, 2010).

Com o ano de 1957 surgiram os materiais supercondutores do tipo II, passando os existentes até então a ser conhecidos como supercondutores do tipo I. Este novo tipo de supercondutores previsto teoricamente por Alexei Abrikosov, é caracterizado por possuir três estados: o estado normal, o estado supercondutor e um estado intermédio, designado por estado misto. O facto de possuir um estado intermédio permite que a transição para o estado normal ocorra de forma gradual, ao invés de acontecer abruptamente como nos do tipo I. Neste estado intermédio, compreendido entre os campos críticos H_{C1} e H_{C2} da Figura 2.23, o material deixa de possuir um diamagnetismo perfeito, e passa a permitir fluxo magnético no seu interior, coexistindo assim regiões do material em estado normal e outras estado supercondutor (Pina, 2010).

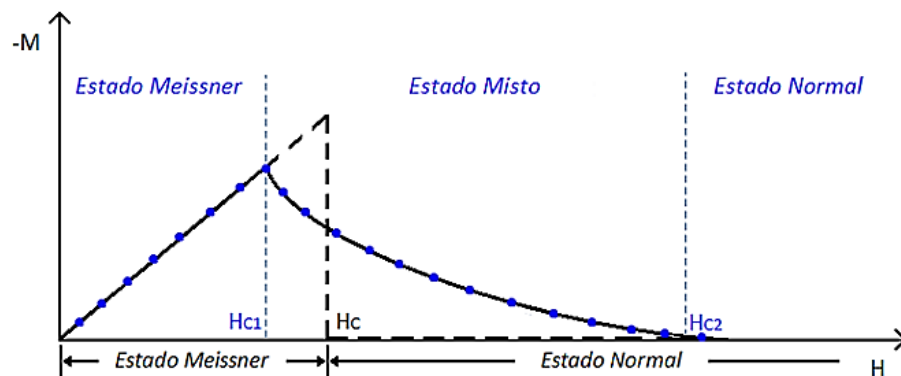


Figura 2.23: Curvas de magnetização de supercondutores: tipo I (tracejado preto) e tipo II (pontilhado azul). Retirado de (Catalão, 2013).

Nos materiais do tipo II existe um grupo que cada vez mais ganha importância, são os supercondutores de alta temperatura, ou simplesmente SAT (Branício, 2001). A descoberta dos SAT marcou uma nova era na supercondutividade, feito que valeu o prémio nobel da física a Georg Bednorz e Alex Müller em 1987, e contribuiu para a diminuição de custos com a criogenia, incitando ao desenvolvimento de aplicações para estes materiais, nomeadamente para melhorar a qualidade de energia em sistemas de potência, como é o caso dos SMES (Denholm, et al., 2010), que seguidamente serão abordados com maior detalhe.

2.3.3. SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage

Os *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES) são dispositivos que permitem armazenar energia magnética no núcleo de uma bobina supercondutora. Quando percorrida por uma corrente contínua a resistência da bobina pode ser considerada virtualmente nula, preservando assim a energia no seu interior sem que haja perdas.

A energia magnética, W_{mag} , armazenada pela bobina supercondutora é dada por (2.11), em que L representa o coeficiente de auto-indução da bobina e I a corrente DC que a percorre.

$$W_{mag} = \frac{1}{2}LI^2 \quad (2.11)$$

Esta tecnologia surgida em meados dos anos 70, foi pensada para armazenar energia em grande quantidade durante a noite e aplica-la na estabilização de picos de consumo durante o dia. Porém um projeto desta escala requeria a construção de dispositivos SMES de grandes dimensões e com custos elevadíssimos. Despesas relacionadas com criogenia (uma vez que os SAT ainda não existiam) e com a construção de estruturas onde pudessem ser instalados, condicionadas pelas elevadas pressões eletromagnéticas, tornando assim este projeto inviável (Boom & Peterson, 1972; Hassenzahl, 1975, 1989).

Apesar destas dificuldades, a que acresce o facto do material supercondutor ser ainda muito caro nos dias de hoje, a forma como se pensa esta tecnologia tem vindo a mudar. As novas apostas, têm passado sobretudo por dispositivos de pequena escala, os micro-SMES (capacidade até 10 MJ), construídos com materiais SAT (Taylor et al., 2012). Neste campo, alguns projetos já concluídos, ou a decorrer, podem ser encontrados em (Taylor & et al., 2012; Amaro, 2013).

Este novo paradigma, leva a que se explore mais a grande capacidade que os SMES possuem de debitar muita potência em pouco tempo, ao invés do seu alto rendimento de armazenamento, sendo então classificados como dispositivos de potência e não de energia. Na literatura é possível encontrar muitas potenciais utilizações desta tecnologia, estando em (Ali et al., 2010) condensada uma grande panóplia de aplicações. Contudo, considerando que a principal finalidade dos SMES não deve ser o armazenamento de energia em grande quantidade, têm-se como principais aplicações:

- **Qualidade de Energia:** a capacidade que estes sistemas têm de injetar grande quantidade de potência de forma quase imediata, permite que mitiguem eficazmente os efeitos prejudiciais de interrupções, flutuações, cavas e sobretensões de curta duração (Molina & Mercado, 2010; Pina, 2010).
- **Uninterruptible power supply (UPS):** numa situação de interrupções de maior duração, isto é, maior que algumas dezenas de ciclos, os SMES podem assegurar o fornecimento de energia à rede durante o arranque de grupos geradores de emergência ou dispositivos de

armazenamento de energia maiores, cujos tempos de resposta são mais longos (Xue, Cheng, & Sutanto, 2005).

- Estabilização da rede: Os SMES conseguem absorver oscilações de baixa frequência, bem como estabilizar a frequência da rede após fenómenos transitórios. Pela sua capacidade de injetar potência ativa e reativa, esta tecnologia também pode ser aplicada para estabilizar pequenas redes descentralizadas com forte implementação de fontes de energia renovável (Molina & Mercado, 2010).

⇒ Constituição do sistema SMES

Um sistema SMES é constituído por três blocos principais:

- Bobina Supercondutora: inclui o sistema de refrigeração e os dispositivos de comutação.
- Sistema de Condicionamento de Potência (SCP).
- Sistema de Controlo.

O seu funcionamento pode ser feito segundo três modos mutualmente exclusivos: carga, persistente e descarga. Assim, se a corrente da bobina estiver abaixo do seu valor de referência é o modo carga que pode ser ativado para que seja armazenada energia. Uma vez carregada, é ativado o modo persistente de forma a manter a corrente. Caso haja carência de energia na rede, a bobina é descarregada.

A Figura 2.24 mostra os principais blocos constituintes do SMES, cuja descrição mais detalhada será feita nas três secções seguintes. Nesta figura é também possível identificar um interruptor, que representa o dispositivo de comutação. Este dispositivo é o responsável por fazer a troca dos modos de funcionamento, e pode ser implementado por eletrónica de potência ou por interruptores de corrente persistente (*persistent current switches*). Quando implementado com eletrónica de potência, pode ser integrado no SCP, em vez de ser no bloco da Bobina Supercondutora, dado que o ambiente criogénico dessa unidade por vezes afeta o funcionamento dos semicondutores (Pina, 2010; Rosenbauer & Lorenzen, 1996).

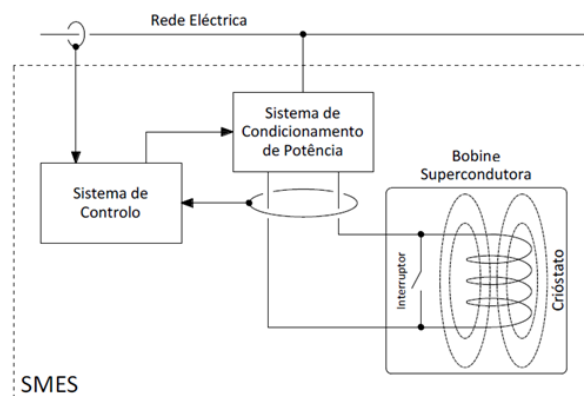


Figura 2.24: Topologia tipo de um sistema SMES (Pina, 2010).

2.3.3.1. Bobina Supercondutora

A bobina supercondutora é o principal elemento do sistema SMES. É nela que é feito o armazenamento da energia elétrica no campo magnético criado pela corrente que a percorre. Para garantir o melhor desempenho do sistema ao menor custo possível, são tidos em conta vários fatores no projeto da bobina, nomeadamente a sua configuração e estrutura, o material supercondutor e temperatura crítica de funcionamento (Luongo, 1996).

As bobinas supercondutoras são por norma construídas em pequenos módulos, designados por panquecas. Estas estruturas podem ser de camada simples (Figura 2.25-a, em cima) ou dupla (Figura 2.25-a, em baixo), e quando necessário podem ser agrupadas, normalmente em série, segundo duas configurações principais: toroidal (Figura 2.25-b) e solenoidal (Figura 2.25-c).

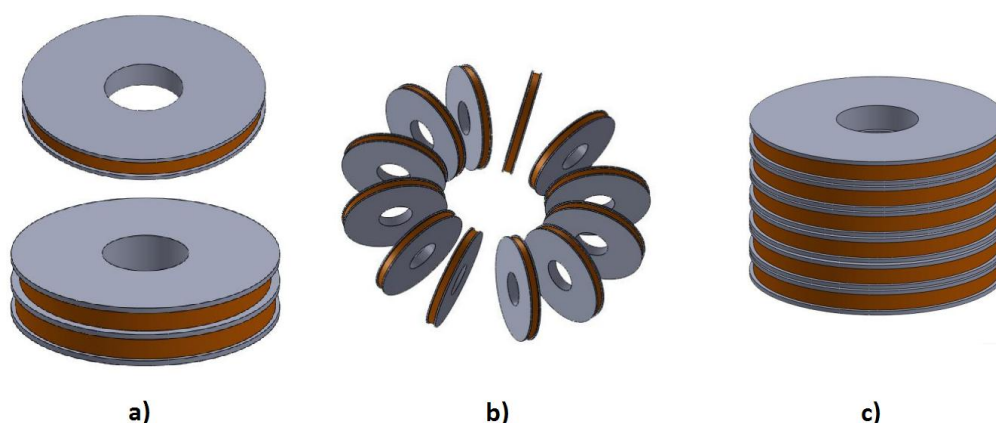


Figura 2.25: Estruturas e topologias de implementação de bobinas supercondutoras. Adaptado de (Amaro, 2013).

Em ambas as configurações existem pontos fortes, que estão expressos na Tabela 2.2. A escolha da configuração dependerá sempre do tipo de projeto a que se destine, mas em termos gerais é a solenoidal que melhor reúne eficiência e preço, sendo por isso a topologia mais utilizada (Karasik & et al., 1999). Dentro desta configuração várias formas de agrupamento podem ser feitas, nomeadamente a tetrapolar e hexapolar, a fim de mitigar a dispersão de campo magnético e diminuir tamanho das bobinas, as suas maiores desvantagens face à topologia toroidal (Pina, 2010).

Tabela 2.2: Pontos fortes das configurações solenoidal e toroidal de bobinas supercondutoras. Adaptado de (Oliveira, 2010).

Solenoidal	Toroidal
<ul style="list-style-type: none">• Estrutura mecânica mais simples;• Permite uma maior densidade de energia armazenada;	<ul style="list-style-type: none">• Menor dispersão de campo magnético;• Menor dimensão;

2.3.3.2. Sistema de Condicionamento de Potência

O sistema de condicionamento de potência tem a responsabilidade de adaptar a corrente contínua do lado da bobina, às grandezas alternadas no lado da rede. Esta interação entre bobina supercondutora e rede pode ser feita nos dois sentidos, sendo por isso o SCP um dispositivo de conversão bidirecional.

São três as topologias básicas de um SCP que podem ser utilizadas num sistema com SMES (Ali et al., 2010):

- Baseada em tirístores.
- Conversor fonte de corrente (CSC⁵).
- Conversor fonte de tensão (VSC⁶) com *chopper*.

A topologia baseada em tirístores, apesar de ser a menos complexa de implementar, tem associadas diversas características negativas, tais como: limitações ao nível do controlo da potência reativa, atrasos contínuos na correção do fator potência e valores de distorção harmónica elevados (mesmo para configurações comandadas com 12 pulsos) (Ali et al., 2010; Casadei et al., 1998). O que faz desta a montagem menos utilizada, pelo que não será mais analisada.

As configurações baseadas em conversores CSC e VSC estão melhor preparadas para ultrapassar os aspetos negativos da topologia anterior. Isto deve-se à utilização de semicondutores que suportam maiores velocidades de comutação, tais como MOSFET, IGBT e GTO, estando a escolha destes componentes dependente da potência de funcionamento do próprio SMES. Em qualquer uma destas topologias é também possível fazer-se um controlo independente da potência ativa e reativa transferida para a rede (Ali et al., 2010).

Tanto para a topologia fonte de tensão como para a fonte de corrente, existem estudos que utilizam configurações multinível. Apesar destas configurações garantirem melhores conversões, dada a sua complexidade não se incluem no escopo desta tese, estudando-se apenas os conversores de dois níveis. No entanto, mais detalhes de *choppers* e conversores multinível utilizados nas montagens VSC, podem ser consultados em (Lee, 1999), e de uma configuração multinível CSC em (Babei, Hosseini, & Gharehpetian, 2006).

⇒ Conversor Fonte de Corrente

A configuração típica de um conversor fonte de corrente pode ser vista na Figura 2.26, neste caso utilizando como semicondutores os GTO. É a forma como comutam os semicondutores que permite carregar, descarregar ou manter a corrente na bobina, sendo o modo persistente feito pela comutação simultânea dos dois interruptores do mesmo braço (Imaie, Tsukamoto, & Nagai, 2000).

⁵ Acrónimo da sua designação em inglês *Current Source Converter*.

⁶ Acrónimo da sua designação em inglês *Voltage Source Converter*.

Contudo esta comutação dos conversores origina harmônicas na corrente de linha, que são filtradas através do circuito ressonante formado pelos condensadores de entrada, C_f , e a indutância de linha, L_s . Outra função essencial dos condensadores de entrada é auxiliarem nos processos de comutação, providenciando um caminho de baixa impedância para os pulsos de corrente do conversor (Bilgin, 2007).

A topologia em questão retira partido do facto dos sistemas SMES serem inerentes fontes de corrente, o que facilita a interação com a rede elétrica e garante grandes velocidades de fornecimento de potência. Outro grande ponto forte desta montagem é a capacidade de diminuir o *ripple* na tensão aos terminais da bobina, e consequentemente diminuir as perdas AC. Este efeito é ainda mais notório através de uma montagem comandada por 12 pulsos (Jiang, et al., 2001; Iglesias, et al., 1995).

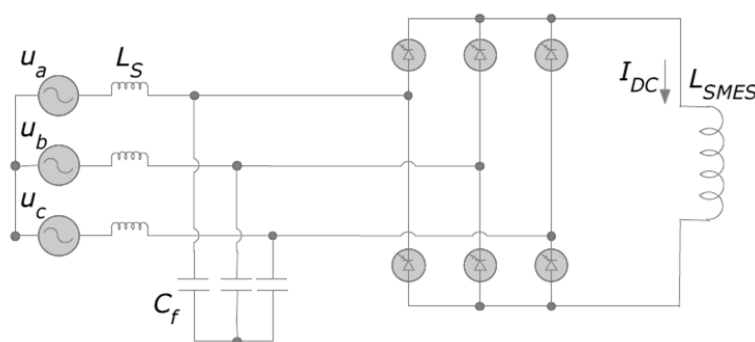


Figura 2.26: Topologia típica de um CSC comandado a 6 pulsos (Pina, 2010).

⇒ Conversor Fonte de Tensão

Uma configuração típica da topologia VSC com *chopper* pode ser vista na Figura 2.27, onde mais uma vez os semicondutores ilustrados são os GTO. Nesta configuração, o VSC é o elemento que faz a ponte entre a rede elétrica a bobina supercondutora, controlando o fornecimento de potência. Aqui são utilizados díodos em roda livre para assegurar a continuidade da energia. O *chopper* é o elemento que controladamente faz a comutação entre os três modos de funcionamento do SMES, regulando a corrente que atravessa a bobina. Já o condensador, C_d , funciona como uma fonte de tensão controlável, que serve de suporte ao funcionamento do VSC e do *chopper*.

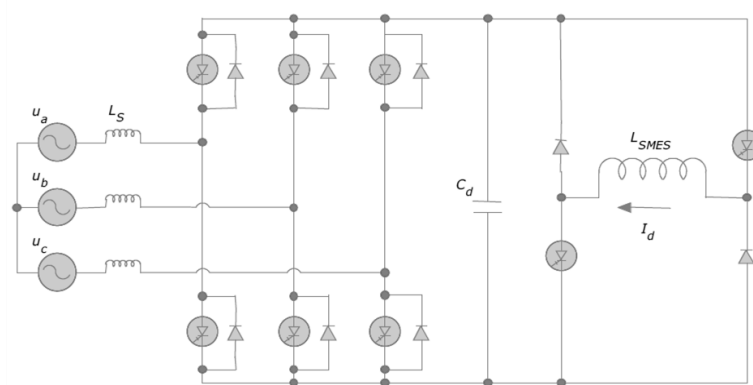


Figura 2.27: Topologia típica de um VSC (Pina, 2010).

O dispositivo *chopper* analisado é de dois quadrantes e as comutações de cada um dos seus modos de funcionamento estão representadas na Figura 2.28. No modo persistente apenas um dos interruptores é fechado, criando-se um caminho de baixa impedância onde é mantida a corrente. Em situação de carga os dois interruptores estão ligados, sendo a energia transferida do condensador para a bobina. Durante esta situação o VSC opera como retificador de modo a repor a energia no condensador. Já para a situação de descarga tem-se o exatamente o cenário contrário, o VSC funciona como inversor, ou seja, a energia é transferida para a rede elétrica, estando para isso os dois semicondutores ao corte. Em suma, o *chopper* faz variar a tensão “constante” no condensador de modo a responder às exigências da bobina (Lee, 1999).

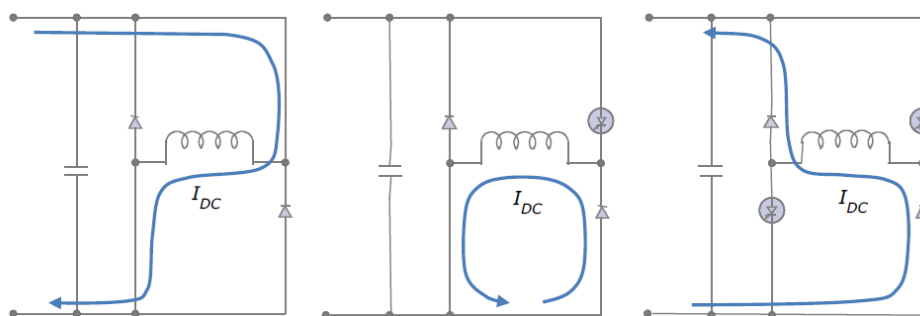


Figura 2.28: Formas de comutação do *chopper* para os diferentes modos de funcionamento: carga (à esquerda), modo persistente (ao centro) e modo de descarga (à direita). Retirado de (Pina, 2010).

A utilização da configuração VSC com o conversor DC-DC é a mais comum, pelo que existe um maior conhecimento desta configuração em relação à topologia CSC. O que ainda se torna mais evidente em aplicações com filtros unificados, pois a configuração típica do UPQC possui um condensador a interligar os seus dois conversores ativos.

Outro dos pontos fortes desta montagem é a necessidade de dispositivos eletrónicos de menor potência, o que se traduz em menores perdas de energia na comutação e em menores custos com semicondutores. Esta diminuição de perdas com a eletrónica de potência vai-se evidenciando cada vez mais à medida que o nível de energia presente na bobina supercondutora vai diminuindo. Na equação (2.14) é calculada a razão (k) entre as correntes máximas e mínimas que podem circular na bobina, ou seja, I_{max} e I_{min} . Para ter a mesma potência na saída, à medida que k aumenta mais energia terá que ser retirada da bobina supercondutora na montagem CSC, do que na VSC com *chopper* (Lee, 1999). No entanto, para situações com razões pequenas, isto é, próximas de 1, acontece o inverso. Mas uma utilização do SMES restrita a esses valores de k limitava a que só uma pequena parte da energia armazenada pudesse ser utilizada, cerca de 30% segundo o exemplo de (Lee, 1999).

$$k = \frac{I_{max}}{I_{min}} \quad (2.14)$$

Pelos vários pontos favoráveis da topologia VSC face à CSC, utilizou-se na implementação realizada um sistema de condicionamento de potência baseado em fonte de tensão com *chopper*.

2.3.3.3. Sistema de Controlo

Num funcionamento ideal a corrente que percorre a bobina supercondutora é contínua. No entanto as dinâmicas de funcionamento do sistema levam a que a corrente neste elemento indutor adquira um comportamento alternado. Este tipo de comportamento está na origem de perdas AC, que por conseguinte prejudicam o desempenho do sistema. Uma explicação mais detalhada sobre a natureza destas perdas, bem como mecanismos que permitem a sua quantificação, podem ser consultados em (Ceballos, 2010).

Outra situação a ser evitada no sistema SMES é a subida de temperatura no material supercondutor acima da sua temperatura crítica. A ocorrer de forma inesperada, tal situação pode levar à destruição da bobina SC.

Torna-se assim imperativo a implementação de um sistema de controlo que garanta o bom funcionamento do SMES. Este deve comandar operações como (Amaro, 2013):

- Comutação do interruptor de corrente persistente (caso exista).
- Cargas e descargas da bobina supercondutora.
- Manutenção da corrente no valor desejado.
- Controlo da temperatura da bobina.
- Prevenir situações de *quench*.

Nos dois últimos tópicos anteriores, são apresentadas as tarefas relacionadas com a manutenção da supercondutividade na bobina e os procedimentos a tomar em caso de falha. *Quench* é a designação atribuída ao aquecimento súbito de uma região da bobina, levando a uma dissipação de energia sob a forma de calor em espaços de tempo muito reduzidos. Este tipo de falha põe em causa a salvaguarda do próprio material, pelo que uma rápida deteção se torna essencial. Em (Catalão, 2013), é possível aferir um método de deteção de *quench* em fitas supercondutoras feitas em Bi-2223⁷, baseado na leitura de campos de indução magnética.

Os três primeiros tópicos são referentes a ações de seleção do modo de funcionamento do SMES. Relativamente ao processo de carga, este deve ser mais lento que o de descarga, por forma a evitar variações bruscas na corrente, causadoras de stresses mecânicos e desgastes do material (Tay & Conlon, 1998). São muitas as técnicas de controlo que podem ser utilizadas para comutar os interruptores do *chopper*, temática que será vista com maior detalhe no subcapítulo seguinte.

⁷ Material supercondutor com composição química Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₂. As fitas constituídas por este material são pertencentes à primeira geração de fitas supercondutoras.

2.4. Técnicas de Modelação

Conhecidos os sinais de referência dos vários sistemas de controlo torna-se então necessário controlar os interruptores de modo a que seja reproduzido esse sinal. Na literatura é grande a panóplia de técnicas utilizadas na modelação dos sinais de comando de conversores, nomeadamente as estratégias baseadas em *Pulse-Width Modulation*, ou simplesmente PWM.

Em (Sheikh & Mondol, 2012) é apresentada uma técnica PWM aplicada a topologias baseadas em fontes de tensão, aqui o controlo da comutação é feito pelo ajuste do *duty cycle* do sinal de disparo dos semicondutores do *chopper*. Também no comando do conversor DC-DC, em (Sutanto & Aware, 2009) é sugerida a aplicação de um controlo histerético. Outras estratégias com algoritmos de inteligência artificial (IA), como a baseada em redes neuronais e a lógica difusa, podem ser consultadas em (Dahiya, et al., 2011) e (Ali et al., 2007; Dahiya, et al., 2011), respetivamente.

À semelhança do que sucede com o controlo do *chopper*, também para o comando dos conversores série e paralelo podem ser encontradas diversas técnicas. Uma das estratégias mais populares no comando de filtros ativos é o controlo por histerese (Rashid, 2011; Nogueira, 2010). Na literatura também se pode aferir a existência de técnicas mais complexas como a *Space Vector Pulse Width Modulation* (SVPWM) (Pregitzer, 2006; Rashid, 2011) e as técnicas baseadas em IA, onde mais uma vez surgem as técnicas baseadas em redes neuronais (Rao & Dash, 2010; Ramchandra et al., 2012) e a lógica difusa (Fatiha, Mohamed, & Nadia, 2011).

A utilização das técnicas de comutação mais complexas possibilita melhores desempenhos, nomeadamente ao nível de perdas de comutação e ruído. Já as estratégias mais simples baseadas em PWM ou com recurso a uma banda de histerese, caracterizam-se por serem de fácil implementação e por apresentarem grande estabilidade (Ramchandra & Kalyanchakravarthi, 2012; Hendawi, Khater, & Shaltout, 2010). Muitos estudos também já demonstraram a eficácia destas técnicas mais simples no comando de conversores de potência, levando a que fossem as escolhidas para a modelar os sinais de comando das implementações efetuadas.

2.4.1. SPWM – *Sinusoidal Pulse Width Modulation*

A técnica de modelação por largura de pulso sinusoidal, ou SPWM, baseia-se na comparação de um sinal de referência com uma onda portadora de frequência fixa. A fim de garantir bons resultados devem ser respeitados dois parâmetros, um índice de modelação (m) menor que 1 e uma razão de frequência de modelação (r_m) superior a 20. De forma a evitar harmónicas e garantir uma modelação PWM igual em cada uma das fases de um sistema trifásico, r_m deve ser inteiro e múltiplo de três (Rashid, 2011).

Os valores de m e p são determinados pelas equações (2.15) e (2.16), onde V_{ref} e f_{ref} representam respectivamente os valores de tensão e frequência do sinal modulador, e V_{port} e f_{port} a tensão e frequência da onda portadora.

$$m = \frac{V_{ref}}{V_{port}} \quad (2.15)$$

$$r_m = \frac{f_{port}}{f_{ref}} \quad (2.16)$$

A Figura 2.29 ilustra um sistema de controlo SPWM. É da comparação entre o sinal modulador (a verde) e a onda portadora (a vermelho) que resulta um trem de pulsos (a azul) que serve de comando aos semicondutores.

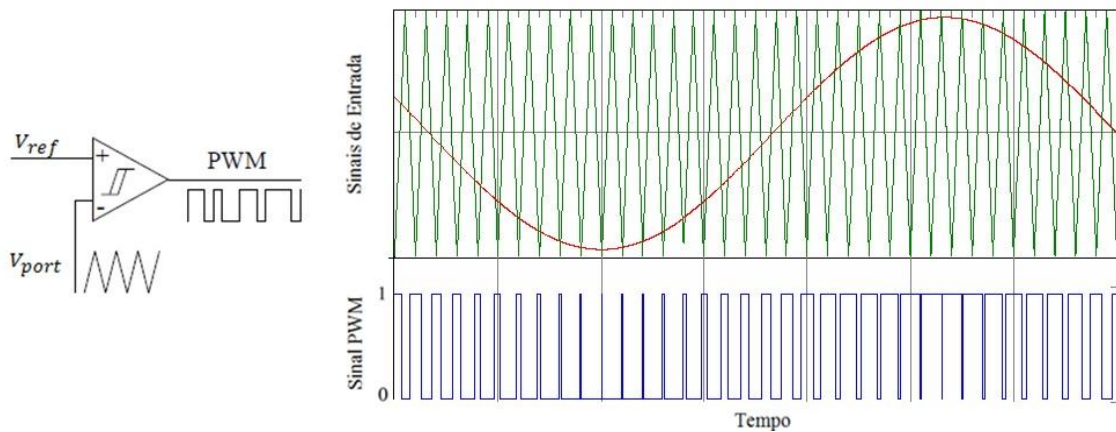


Figura 2.29: Controlo baseado em SPWM.

2.4.2. Controlo por Histerese

O funcionamento da estratégia de controlo por histerese (ver Figura 2.30) assenta na comparação do sinal de entrada (S_{atual}) com dois sinais de referência, um correspondente a um limite superior e outro correspondente a um limite inferior, sendo a diferença entre estes dois limites denominada por banda de histerese. Assim, quando o sinal gerado ultrapassa o limite superior ($S_{atual} + H_{sup}$) o interruptor é desligado e quando volta a cair até ao limite inferior ($S_{atual} + H_{inf}$), onde o interruptor é novamente ativado.

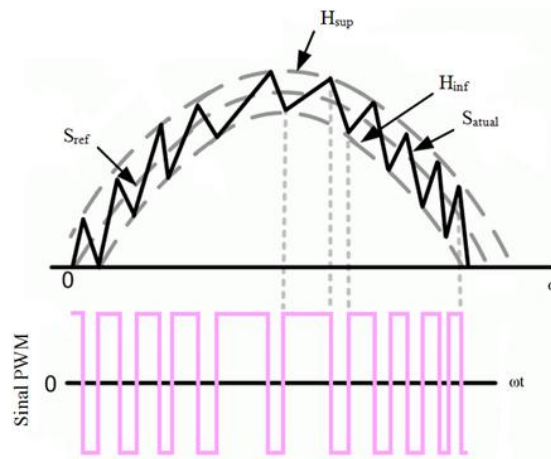


Figura 2.30: Controle por Histerese.

As duas técnicas de modelação antes apresentadas têm a desvantagem de não gerarem um sinal PWM com período fixo, isto impede comutações constantes, causando *ripples* de tensão, assim como a possibilidade de se originarem harmónicas indesejadas (Hendawi et al., 2010; Milosevic, 2003).

Esta situação pode ser atenuada aumentando a frequência da onda portadora no caso modelação SPWM, ou diminuindo a banda de histerese no caso da segunda técnica. Ambas as situações levam a um aumento da frequência de comutação dos semicondutores, o que provoca um aumento das perdas de comutação, bem como maiores esforços mecânicos dos dispositivos de electrónica de potência (Hendawi et al., 2010; Patel et al., 2009), pelo que na sua escolha há que estabelecer um compromisso entre as perdas e a qualidade do sinal gerado na saída.

2.5. Síntese do Capítulo

Neste capítulo analisaram-se alguns dos aspetos introdutórios mais relevantes para compreensão da temática em análise. A partir da descrição dos principais problemas que afetam as redes elétricas de média e baixa tensão, referenciaram-se as normas que definem padrões qualitativos da rede, bem como algumas das soluções mais estudadas para auxiliar no seu cumprimento. Destas, a utilização de conversores ativos mereceu um aprofundamento maior, através da análise do seu funcionamento nas suas principais configurações - série, paralela e unificada – acompanhada de um estudo das suas principais teorias de controlo e aplicações.

Na análise destes elementos, verificou-se a importância de se utilizar uma unidade de armazenamento de energia na melhoria da QEE. Como tal, comparou-se com a solução baseada em supercondutores adotada com diferentes tecnologias existentes, ficando patente que apesar de um elevado custo, a sua potencialidade para aplicações de *Power Quality* é grande.

Finalmente, o estudo da ação da parte de controlo no comando dos semicondutores, de diversas de técnicas de modelação, permitiu aprofundar estratégias, que pela simplicidade de implementação e fiabilidade já demonstrada, foram escolhidas para aplicação posterior.

3. Dimensionamento e Implementação

A larga maioria dos problemas com subtensões não ultrapassa 50% da tensão nominal (ver Figura 2.1). A partir da informação anterior, e tendo esta dissertação como principal alvo a montagem de um UPQC integrado com um sistema de armazenamento SMES (Figura 3.1). Ao longo do presente capítulo serão descritos todos os passos que levaram ao seu dimensionamento, aplicado a pequenas cargas trifásicas de estudo (até 5 kW), sendo cada um dos seus principais constituintes – SMES, FAP e DVR – analisado individualmente.

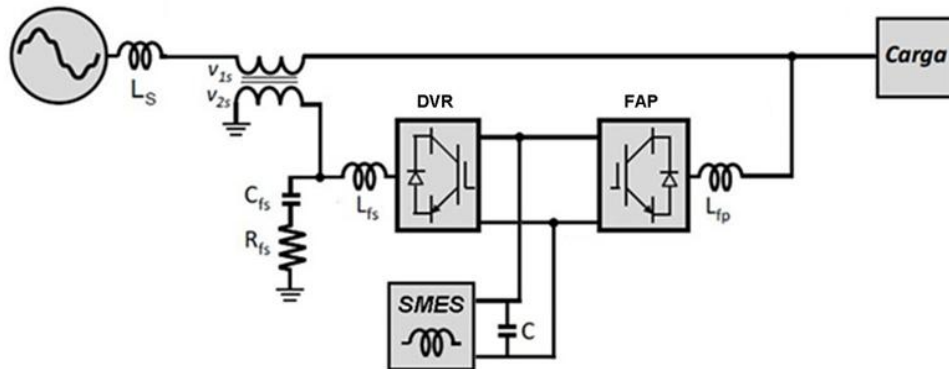


Figura 3.1: Representação unifilar do sistema implementado.

3.1. Sistema SMES

Uma das peças chave da configuração implementada e elemento diferenciador de muitos sistemas utilizados na melhoria da QEE é o sistema armazenador de energia. Nas subsecções seguintes são apresentadas as características dos vários constituintes da unidade SMES utilizada.

3.1.1. Bobina Supercondutora

O dimensionamento da bobina supercondutora não fazia parte do estudo desta dissertação, pelo que no modelo implementado utilizou-se um indutor projetado numa outra dissertação anterior. Em (Oliveira, 2010) está dimensionada uma bobina teórica com uma capacidade de armazenamento de 1 kJ e um coeficiente de autoindução, L_{SMES} , de 0,41 H. Este elemento é constituído por fita supercondutora feita de BSCOO-2223⁸ e funciona abaixo da temperatura de ebulição do azoto líquido, ou seja, até 77 K. A sua corrente crítica é de 90 A, mas por razões de segurança deve ser considerada alguma margem, pelo que o mesmo autor, considerou como valor limite de referência, I_{ref} , 70 A. Na Tabela 3.1 estão condensados os valores dos principais parâmetros considerados.

Tabela 3.1: Principais parâmetros da bobina SC.

Grandeza	Valor
W_{mag}	1000 J
L_{SMES}	0,41 H
I_{ref}	70 A

⁸ Lê-se “bisco” 2223 e é outra designação para o Bi-2223.

3.1.2. Topologia do Sistema de Condicionamento de Potência

O *chopper* é o elemento que controla a energia que circula entre a rede e a bobina. Como anteriormente apresentado, isto pode acontecer de três modos: carga, descarga e persistente, estando cada um deles ilustrado na Figura 2.28.

A topologia baseada em fonte de tensão porventura mais encontrada na literatura, é a configuração de dois quadrantes com semicondutores IGBT (Figura 3.2). Contudo, esta configuração não apresenta nenhum mecanismo para lidar com excessos de energia no barramento, que é precisamente onde o DVR tem maiores limitações (Monteiro, 2008).

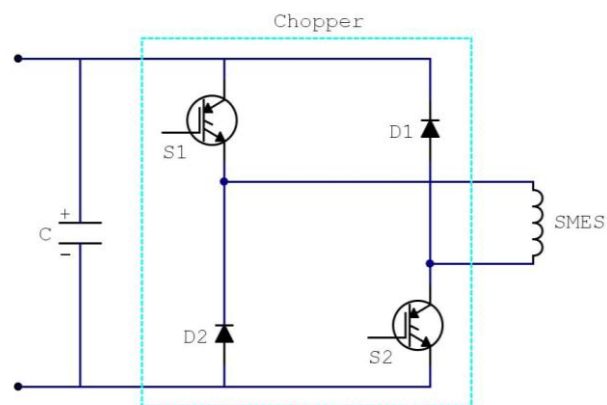


Figura 3.2: Conversor típico VSC com IGBT.

Na configuração anterior, quando o lado armazenador atinge o seu limite e a sobretensão perdura, vários cenários podem ser considerados. Se o DVR mantiver o seu funcionamento normal, ou seja, se continuar a retirar a energia em excesso da rede, a tensão no lado contínuo irá aumentar. Já se o conversor é desligado a energia em excesso será entregue às cargas ligadas à rede, situação que poderá ser impedida através do acionamento de mecanismos de corte total do fornecimento de eletricidade. Estas situações podem levar à destruição de componentes eletrônicos, ou até mesmo cortar o fornecimento de energia elétrica na sua totalidade, podendo ocasionar prejuízos bastante avultados.

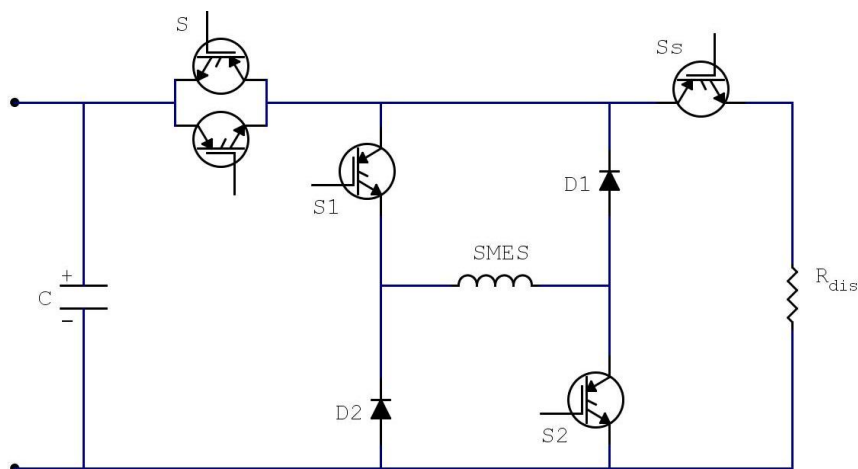


Figura 3.3: Sistema de condicionamento de potência implementado.

Na Figura 3.3 está presente a configuração implementada. Aqui, quando a tensão no barramento sobe acima dos limites de referência é acionado um circuito dissipador de modo a descarregar parte da energia armazenada na bobina supercondutora, tal como mostra a Figura 3.4.

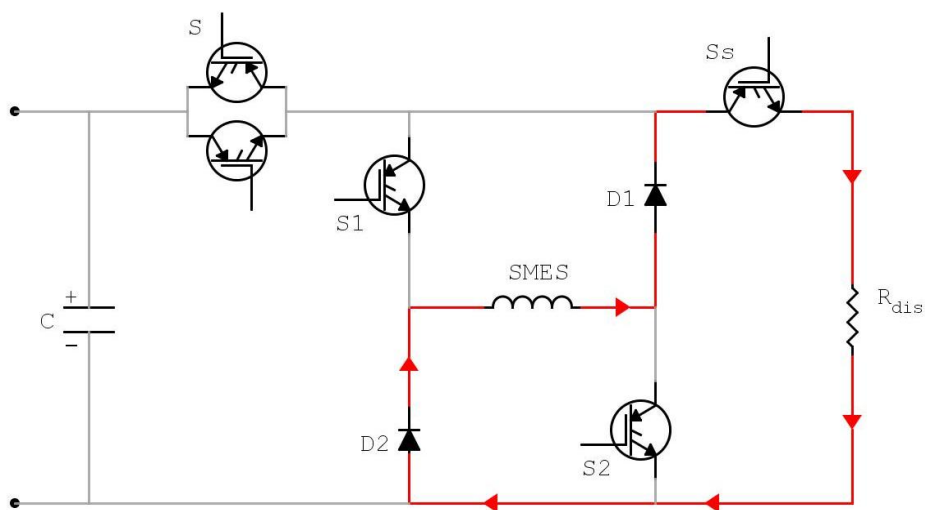


Figura 3.4: Circuito de dissipação da energia da bobina supercondutora.

Como a bobina descarrega muito rápido a tensão do condensador permanece praticamente constante, ficando o circuito de dissipação similar a um circuito RL. Assim a velocidade de descarga da bobina pode ser calculada através da constante de tempo (τ), sendo esta grandeza calculada através da equação (3.1), onde R representa a resistência de dissipação e L o coeficiente de autoindução da bobina. O valor considerado para a resistência de dissipação foi de $10 \, \Omega$, o que permite descarregar 63,2%⁹ da corrente armazenada na bobina em cerca de 4 ms. Através de simulações (capítulo 4) verificou-se que com esta magnitude de descarga o sistema atingiu os níveis de desempenho pretendidos.

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (3.1)$$

3.1.3. Funcionamento do Sistema de Controlo

Durante o funcionamento normal, ou seja, sem a ocorrência de distúrbios de tensão, o sistema de controlo deve fazer o carregamento do sistema de armazenamento de energia, comutando o *chopper* entre os modos de carga e persistente. Como será visto mais adiante, a tensão no barramento contínuo deverá estar sempre acima de um valor mínimo, pelo que só se permite que seja transferida energia para o sistema de armazenamento quando a tensão no condensador está próxima do seu valor de referência. A imposição desta condição é de extrema importância, pois na forma de atuar do sistema de controlo, caso a bobina supercondutora não esteja carregada esta solicitará a energia contida no condensador do barramento. Contudo, no *DC Link* foi utilizado um condensador com uma capacidade de armazenar de energia muito inferior à do próprio dispositivo de armazenamento. Sem a imposição desta condicionante o sistema deixaria de funcionar, pois, a bobina SC solicitará

⁹ Learn About Electronics. [Consult. 10/09/2013]. LR time Constant. Disponível em: http://www.learnabout-electronics.org/ac_theory/dc_ccts45.php

continuamente energia, conduzindo à descarga total do condensador, entrando-se numa situação cíclica de difícil reversão.

Quando ocorrem distúrbios de tensão, o sistema de controlo tem como objetivo estabilizar a tensão no barramento DC. Para tal o *chopper* deve descarregar a bobina supercondutora, quer seja para compensar cavas e interrupções, transferindo energia para o *DC Link*, quer seja para mitigar os efeitos de sobretensões. Contudo, neste último caso é para a resistência de dissipação que uma pequena parte da energia armazenada na bobina é descarregada, possibilitando ao sistema de armazenamento continuar a receber energia sem que se comprometam os seus limites por um tempo teoricamente infinito. Nesta situação, o sistema de controlo além colocar o *chopper* em modo de descarga, deve ainda desligar os semicondutores antiparalelos S e ativar o interruptor Ss, por forma a acionar o circuito de dissipação ilustrado na Figura 3.4. Esta dinâmica de funcionamento só se torna possível porque o SMES descarrega de forma quase instantânea, não causando oscilações significativas na tensão do barramento.

Na Figura 3.5 é mostrada a evolução da tensão no barramento, durante uma situação onde a tensão da rede sobe 50% acima da tensão nominal da rede e onde se desliga o sistema de dissipação durante esta ocorrência. Como se pode aferir nesta figura, para condensadores de menor capacidade mais pertinente se torna o sistema de dissipação.

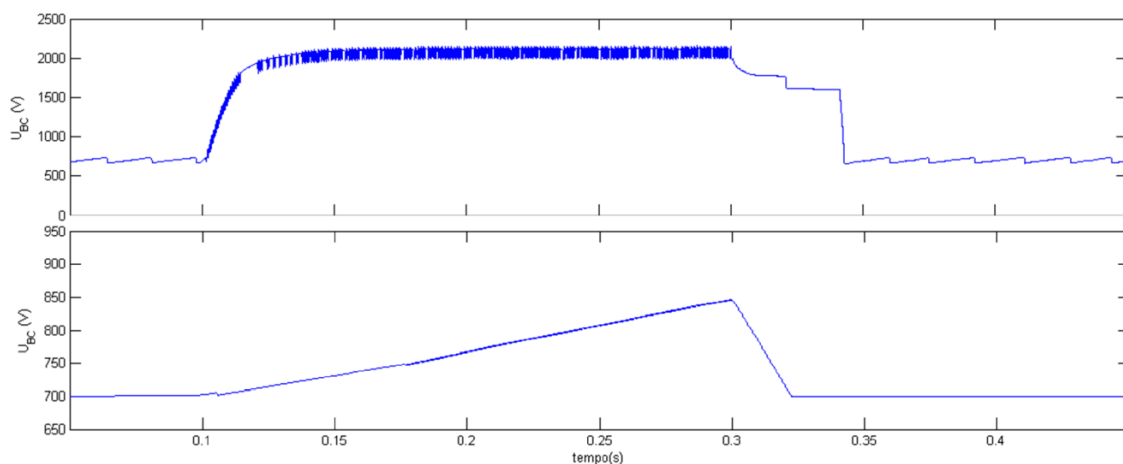


Figura 3.5: Evolução da tensão no barramento perante uma sobretensão de 50%, para o condensador utilizado (em cima), para um condensador com uma capacidade de armazenamento de energia igual à SMES.

Em todos os processos de funcionamento da unidade SMES, os sinais de comutação dos vários interruptores foram modelados através de um controlo histerético. No fluxograma da Figura 3.6 podem ser vistas as várias dinâmicas do funcionamento do sistema de controlo anteriormente descritas.

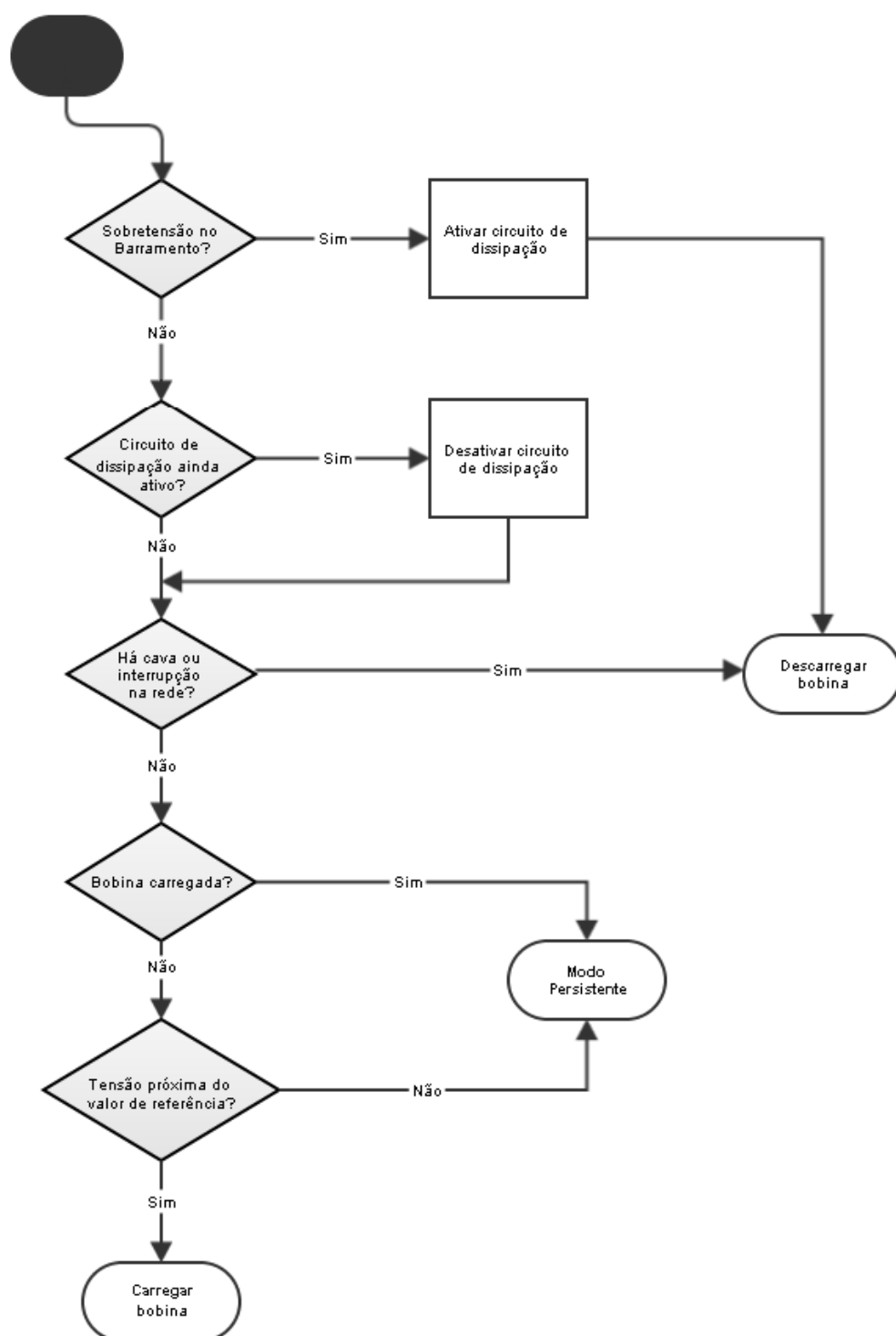


Figura 3.6: Funcionamento do sistema de controlo da bobina SC.

3.1.4. DC Link

Explicado o sistema de controlo, nesta subsecção será mostrado o seu funcionamento. Aqui será analisado com maior detalhe o comportamento da corrente na bobina supercondutora e a tensão no condensador do barramento DC, durante os processos de carga e descarga.

⇒ Funcionamento sem distúrbios

Como já referido, o carregamento da bobina só acontece quando a tensão do condensador do barramento atinge um determinado valor, estando o restante tempo em modo persistente. A Figura 3.7 mostra este processo.

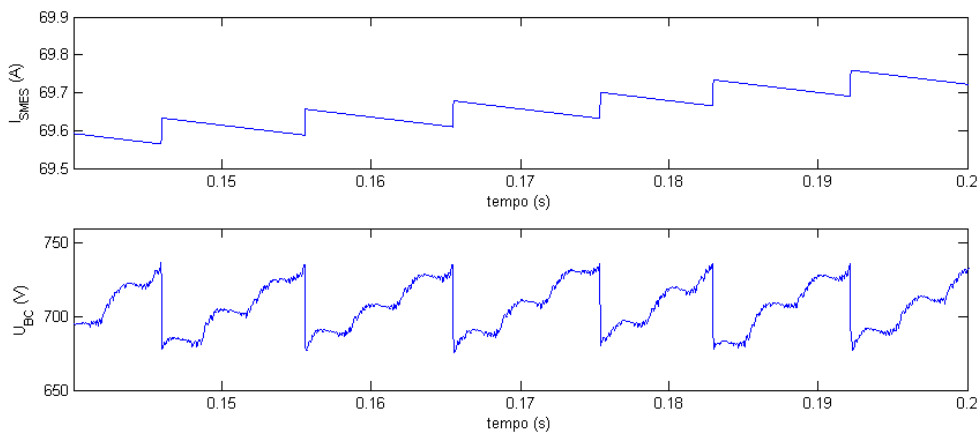


Figura 3.7: Evolução da corrente na bobina do SMES e tensão no barramento contínuo.

Na Figura 3.8 observa-se a evolução da corrente na bobina até se atingir o valor de 63.2%. Este valor corresponde a cerca de 1/5 do tempo de carga de um indutor num circuito RL de 1ª ordem com tensão continua ¹⁰. Através de uma extrapolação, pode-se prever um tempo total para o carregamento da bobina próximo de um minuto. Em termos de simulação, trata-se de um processo que requer demasiado processamento, razão pela qual não foi simulado na totalidade. No entanto, numa aplicação real não se prevê que este tempo de carga ponha em causa a manutenção da QEE, ainda mais porque na ocorrência de um distúrbio o sistema responde com a energia armazenada até então.

¹⁰ *Learn About Electronics*. [Consult. 10/09/2013]. *LR time Constant*. Disponível em: http://www.learnabout-electronics.org/ac_theory/dc_ccts45.php

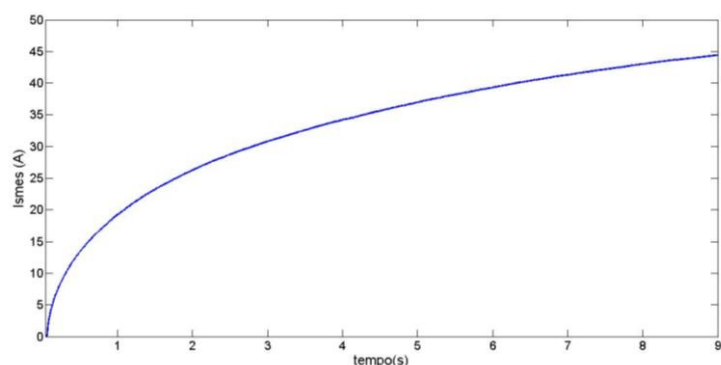


Figura 3.8: Evolução da corrente na bobina supercondutora, estando inicialmente descarregada.

⇒ Sobretensão no barramento

Ao contrário do que sucede no carregamento da SMES, o processo de descarga é de extrema rapidez. Assim, sempre que a tensão no barramento ultrapassa um certo valor limite (definido como 5% acima da tensão de referência do barramento) é acionado o circuito de dissipação para que a SMES perca um pouco da sua corrente (Figura 3.9). Esta forma de atuar é tanto válida para o funcionamento normal, como para situações de sobretensão na rede, prevenindo desta forma situações similares à verificada na Figura 3.5.

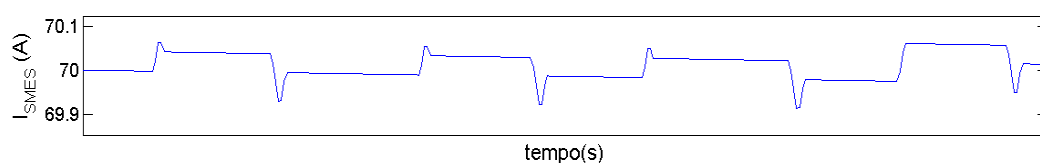


Figura 3.9: Comportamento da corrente na bobina supercondutora durante sobretensões.

⇒ Cavas e interrupções

Em descarga, a energia na bobina não decai linearmente. Segundo (Lee, 1999) quando a corrente na bobina atinge 30% do seu valor máximo, apenas contém 9% do total de energia armazenada. À medida que a corrente na bobina é menor, o seu declive aumenta, até chegar a um ponto em que deixa de conseguir manter a tensão no condensador, ainda antes até, da sua energia findar na totalidade. Na Figura 3.10 os pontos destacados representam respetivamente, o momento em que a corrente na bobina acaba e o valor da tensão no condensador nesse instante.

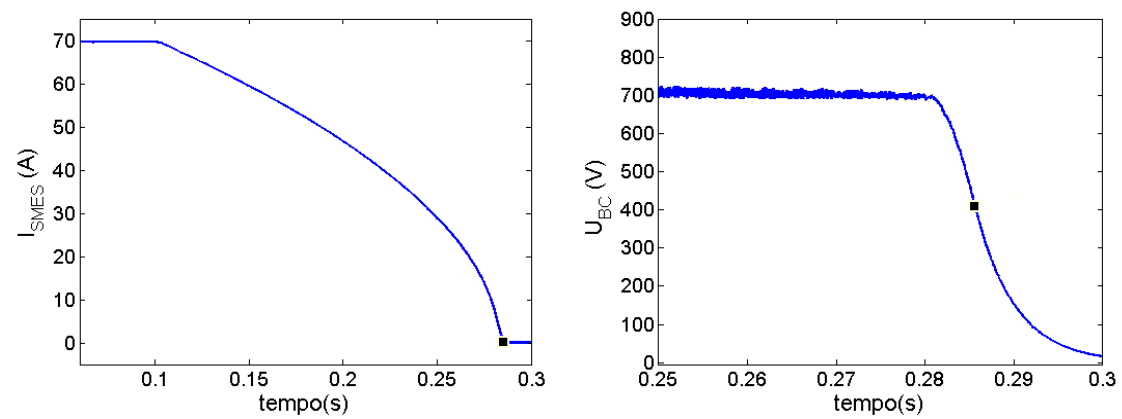


Figura 3.10: Curva de descarga da corrente da bobina SC e respetiva corrente no condensador do barramento DC.

3.2. Filtro Ativo Paralelo

Para o desenvolvimento deste componente adotou-se um SCP em fonte de tensão. Nesta subsecção são mostrados os passos que levaram ao dimensionamento do condensador e do filtro passivo L_{FAP} , que em conjunto com o conversor trifásico de 6 pulsos, se constituem como os principais elementos do filtro ativo paralelo, tal como ilustrado na Figura 3.11.

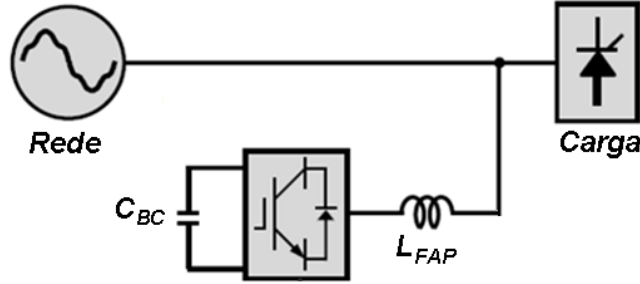


Figura 3.11: Diagrama simplificado do FAP implementado.

As principais funcionalidades do FAP são a compensação de harmónicas de corrente e a manutenção da tensão no barramento DC, com correspondente alimentação do sistema armazenador de energia. No ponto seguinte serão vistos vários aspetos do seu sistema de controlo e descrito o papel determinante que o dispositivo desempenha no suporte da rede elétrica durante interrupções.

3.2.1. Dimensionamentos

⇒ Condensador

Para se ter um controlo total do conversor do FAP é necessário garantir que os díodos que formam a ponte conversora não conduzam, ou seja, devem estar polarizados negativamente. Caso contrário, durante a retificação, o FAP terá um comportamento similar a uma potente retificadora comum, ou seja, terá uma tensão dada por (Rashid, 2011):

$$U = \sqrt{2} \frac{6}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{3} U_s \sin(\omega t) d\omega t = \sqrt{6} \frac{6}{\pi} U_s \sin\left(\frac{6}{\pi}\right) \quad (3.2)$$

com U_s como sendo o valor eficaz da tensão simples à entrada do conversor.

Uma forma de evitar esta situação não controlada, é garantindo que a tensão no lado contínuo (U_{BC}) esteja sempre acima da tensão composta da rede (u_c), tal como ilustrado na Figura 3.12. Assim, com U_c a representar o valor eficaz da tensão composta da rede, a tensão no barramento DC deverá respeitar a seguinte condição (Teke, 2011):

$$U_{BC} > \frac{1.15 \sqrt{2} U_c}{m} \quad (3.3)$$

sendo a capacidade do condensador do barramento (C_{BC}) calculada por (Teke, 2011):

$$C_{BC} = \frac{m I_{FAP}}{2 \omega_s \Delta U_{BC}} \quad (3.4)$$

com ω_s a representar a frequência de comutação em radianos por segundo, que também pode ser calculada através do seu valor em Hz (f_s), segundo:

$$\omega_s = 2 \pi f_s \quad (3.5)$$

Na equação (3.4) encontra-se ainda o valor da tensão de *ripple* do barramento, ΔU_{BC} , bem como a corrente de saída do filtro ativo paralelo, simbolizada por I_{FAP} . Esta última grandeza é calculada tendo em conta a situação de maior fornecimento de corrente, que ocorre aquando de interrupções totais na rede elétrica. Assim a partir da potência de uma carga trifásica (P_L) puramente resistiva tem-se:

$$I_{FAP} = \frac{P_L}{\sqrt{3} U_c} \quad (3.6)$$

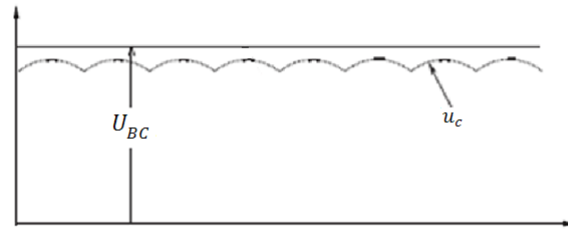


Figura 3.12: Tensão mínima do barramento. Adaptado de (Rashid, 2011).

Considera-se que a carga de 5kW é ligada a uma rede elétrica com características similares à rede elétrica portuguesa. Para um índice de modulação unitário, na equação (3.3), verifica-se que a tensão no barramento deve ser superior a 648 V, pelo que se escolheu como tensão de referência, $U_{BC}=700$ V. Seguidamente, com (3.4) obtém-se $C_{BC} = 5 \mu F$, onde para isto se utilizou uma frequência de comutação de 10kHz, uma tensão de *ripple* de 2% da tensão de referência do barramento, bem como a corrente calculada por (3.6). No entanto a equação (3.4), não tem em conta as oscilações provocadas pela não linearidade das cargas, pelo que o mesmo autor recomenda que se aumente o condensador de modo a mitigar esta situação. Como tal, aumentou-se a capacidade do condensador para 50 μF , o que possibilitou, não só menores valores de *ripple* da corrente compensada, como ainda uma melhor estabilização da tensão no próprio barramento contínuo.

⇒ Filtro Passivo

Segundo (Chaoui et al., 2008) para o dimensionamento do elemento indutivo de filtragem (L_{FAP}), que estabelece a ligação entre o conversor paralelo e a rede elétrica, também não se tem em conta o tipo de carga. Assim, este pode ser obtido considerando apenas a frequência de comutação do conversor, o *ripple* da corrente pico a pico de compensação ($\Delta I_{FAP(p-p)}$) e a tensão do barramento. Através de (3.7) e considerando um valor de 4% de *ripple* para a corrente I_{FAP} , obtém-se um indutor de 15 mH.

$$L_{FAP} = \frac{U_{BC}}{6 f_s \Delta I_{FAP(p-p)}} \quad (3.7)$$

3.2.2. Sistema de Controlo

Anteriormente, já se mencionou que o método baseado em eixos de referência síncrona foi a estratégia escolhida para calcular as correntes de referência do conversor paralelo.

O método SRF também possibilita que se exerça controlo da tensão do barramento contínuo. Para que esta ação seja mais eficiente, em (Rashid, 2011) é recomendado utilizar-se um controlador PI, onde no seu dimensionamento devem ser consideradas as seguintes relações:

$$k_P \leq \frac{C_{BC} U_{BC}}{3 I_{FAP} L_{FAP}} \quad (3.8)$$

$$k_I \leq \frac{k_P (U_c \cos \varphi - 2 I_{FAP} R_{FAP})}{3 I_{FAP} L_{FAP}} \quad (3.9)$$

Como o FAP coloca a tensão da rede em oposição de fase com a corrente, então considera-se o fator de potência unitário, e desprezando-se as perdas do próprio conversor (R_{FAP}) tem-se:

$$k_I \leq \frac{k_P U_c}{3 I_{FAP} L_{FAP}} \quad (3.10)$$

O método de eixos de referência síncrona deve incorporar este novo componente, pelo que o seu diagrama foi novamente reajustado, tal como mostrado na figura em baixo.

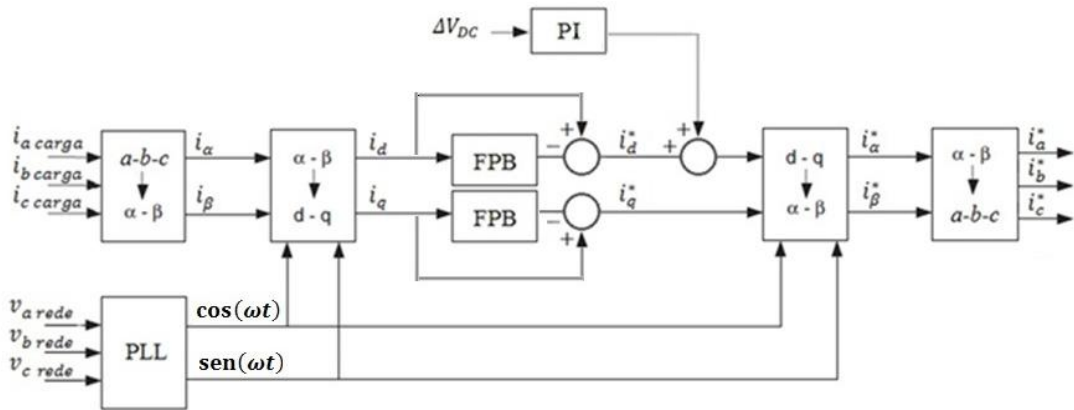


Figura 3.13: SRF com controlo da tensão DC através de um controlador PI.

Na modelação dos sinais de referência utilizaram-se controladores histeréticos. Na Figura 3.14 é mostrado o sinal de referência calculado pelo método SRF e o sinal obtido, para uma simulação efetuada com o sistema implementado (capítulo 4), verificando-se a existência de um bom seguimento.

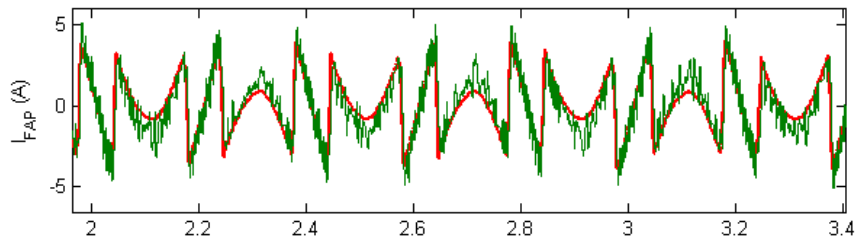


Figura 3.14: Sinal de referência calculado pelo método SRF (a vermelho) e, corrente na saída do FAP (a verde) para a fase correspondente

3.2.3. Atuação durante Interrupções

O conversor série é o componente responsável por compensar os principais distúrbios de tensão. Contudo no pior dos cenários, onde haja por exemplo a destruição de linhas a montante das instalações finais, o sistema série deixa de poder atuar. Neste caso, para assegurar a manutenção do funcionamento das cargas, o sistema de armazenamento injeta potência através do FAP (Han et al., 2006), como mostrado na Figura 3.15.

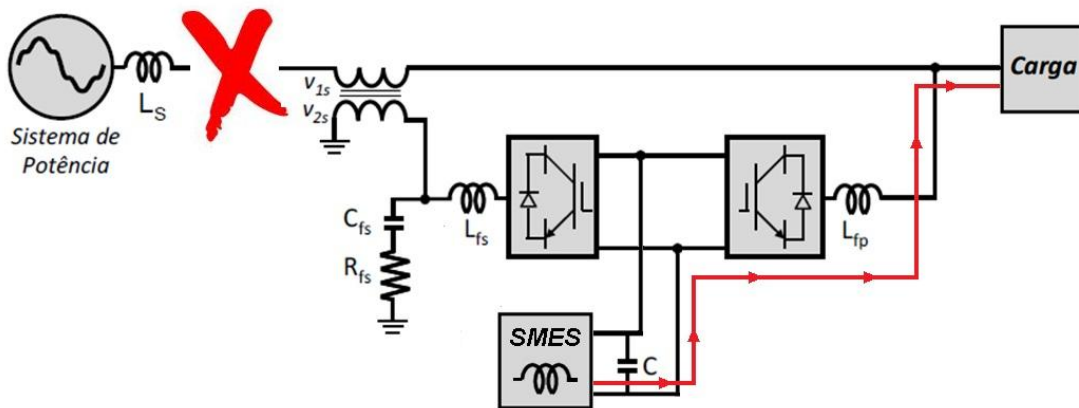


Figura 3.15: Funcionamento do sistema implementado durante uma interrupção total.

Uma das adversidades vindas da aplicação desta topologia surge no momento em que a rede regressa. Nessa altura, se o sistema de compensação de interrupções é desligado de imediato, ocorrem transitórios de potência. Para atenuar este efeito, criou-se um algoritmo que aguarda 4 ms desde o momento em o sistema de deteção de falhas verifica que a rede está de volta, e só após findar este tempo é que se desativa o sistema de compensações. Os resultados de uma transição, imediata e suave, podem ser vistos na Figura 3.16. Já o bloco e o código utilizado para fazer este sistema de transição suave podem ser consultados no Anexo 3.

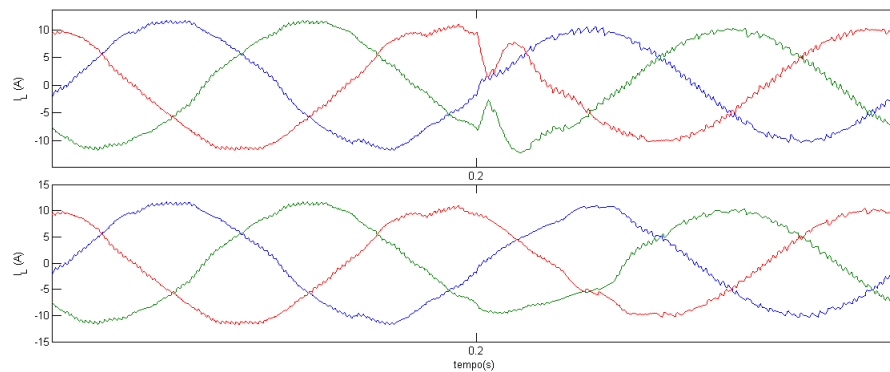


Figura 3.16: Transitório de tensão antes e depois da aplicação do algoritmo de transição suave.

A forma como é controlado este modo de operação do FAP é similar à do compensador série, pelo que uma explicação mais detalhada será feita na subsecção seguinte. Esta unidade deixa no entanto de exercer a sua principal tarefa que consiste em compensar harmónicas de corrente.

3.3. Dynamic Voltage Restorer

O DVR projetado está habilitado a compensar distúrbios de tensão, cavas e sobretensões, com uma magnitude até 50% divergente da tensão nominal de cada fase, ou seja, $K_{dist} = 0,5$.

Dimensionados já o sistema de armazenamento de energia e o condensador do *DC Link*, resta para o DVR, projetarem-se os transformadores e filtros passivos de cada fase (ver Figura 3.17). Esta será uma das temáticas desta subsecção, sendo outra, a descrição mais detalha do seu sistema de controle.

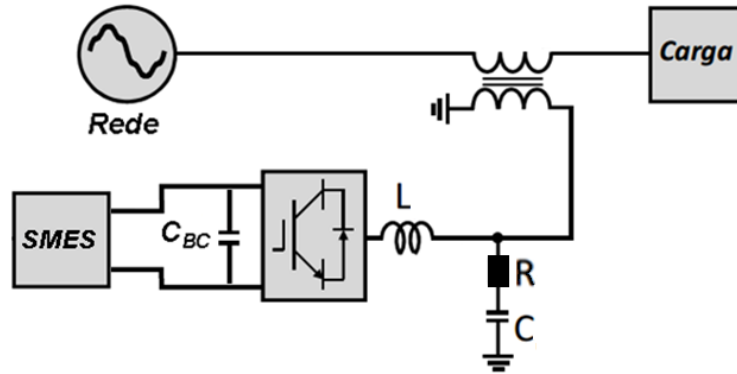


Figura 3.17: Representação simplificada do DVR implementado.

3.3.1. Dimensionamentos

⇒ Transformador

Na escolha do transformador devem ser considerados fatores como a razão entre o número de espiras dos lados primário e secundário e a potência do próprio transformador (Deshmukh & Dewani, 2012). Na topologia implementada utilizam-se três transformadores monofásicos, que a fim de se evitarem saturações, devem ser projetados com uma certa margem de segurança. Segundo (Galassi, 2006), a potência de cada transformador (P_{transf}) deverá ser o dobro da potência fornecida por cada fase do conversor série (P_{DVR}), ou seja:

$$P_{transf} = 2 P_{DVR} \quad (3.11)$$

onde:

$$P_{DVR} = K_{dist} U_s I_s \cos \theta \quad (3.12)$$

Para um fator potência unitário e I_s igual à corrente calculada para o filtro paralelo, I_{FAP} , obtém-se uma potência de 836 W, pelo que P_{transf} deverá ter no mínimo, um valor próximo de 1700 W.

Utilizou-se 3,5 como valor para a razão (r) entre o número de espiras dos lados primário e secundário dos transformadores. Este valor foi ajustado através de simulações, mas teve como base a seguinte equação (Teke, 2011):

$$U_{BC} = r \sqrt{2} U_s U_{dist} \quad (3.13)$$

⇒ Filtro Passivo

Para filtrar as harmônicas de alta frequência resultantes da comutação do conversor, aplicou-se um circuito RC paralelo com L . A sua colocação foi feita no lado secundário do transformador, de modo a estar mais perto da fonte geradora de harmônicas.

Para o seu dimensionamento seguiram-se os passos apresentados em (Galassi, 2006), onde o valor de C é obtido a partir do cálculo da reatância capacitiva (X_C). Considerando que este pode apresentar quedas de tensão, simbolizadas pelo coeficiente k_u , então:

$$X_C = k_u Z_{conv} \quad (3.14)$$

em que Z_{conv} representa a impedância base dos conversores de cada fase e o coeficiente k_u representa as quedas de tensão no indutor de filtragem. No seu cálculo há que considerar a tensão presente no secundário, obtida através de:

$$V_{sec} = r (U_s K_{dist}) \quad (3.15)$$

A parte da expressão anterior destacada dentro de parênteses, não é mais do que a tensão no lado primário. Para se obter a impedância dos conversores, torna-se ainda necessário calcular a corrente de saída do conversor, I_{conv} , dada através da equação (3.16). Aqui, o coeficiente k_i representa as quedas de corrente no condensador de filtragem, sendo U_{BC_min} o valor mínimo que a tensão deve possuir no barramento. Para esta última grandeza considerou-se o valor obtido pela equação (3.3), ou seja, 648 V.

$$I_{conv} = 3 \frac{U_{BC} 0.8165 (1+k_u)(1+k_i) U_c I_s (1-K_{dist})}{\sqrt{2} U_{BC_min} U_s} \quad (3.16)$$

A grandeza Z_{conv} é finalmente calculada em (3.17), onde se considera uma margem de 10% em relação a V_{sec} , derivada da dinâmica do filtro.

$$Z_{conv} = \frac{1.1 V_{sec}}{I_{conv}} \quad (3.17)$$

A capacidade obtida para o filtro é de 9 μF , isto se for considerando o valor de 10% para os coeficientes k_i e k_u . O valor de L é calculado através da equação (2.1), considerando uma frequência de corte de 500 Hz obtém-se um indutor de 13 mH.

Adicionalmente para aumentar a capacidade de filtragem, juntou-se uma resistência em série com o condensador, considerando a mesma frequência de corte, obteve-se uma resistência R de 42 Ω , segundo:

$$f_n = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.18)$$

Apesar de este dimensionamento assegurar um bom nível desempenho do sistema, verificou-se nas simulações do sistema implementado que aumentando a indutância de filtragem e diminuindo a capacitância do condensador, o desempenho global melhorava. Utilizou-se então um condensador de com 1,5 μF e uma indutância com 95 mH, tendo sido igualmente aumentada a resistência para 70 Ω .

3.3.2. Controle

O conversor utilizado no DVR implementado seguiu uma configuração em *full H-bridge*, similar à ilustrada na Figura 3.18. Dependente do sistema de controle, esta topologia pode apresentar vários modos de funcionamento. Na forma mais comum de controle, os comutadores são acionados aos pares e de forma inversa, ou seja, só um par deve estar ON em cada momento, caso contrário ocorrem curtos circuitos indesejados. Com base na nomenclatura atribuída à Figura 3.18, tem-se:

- S1 e S4 ativados: energia sai do condensador C.
- S2 e S3 ativados: energia entra no condensador C.
- S1 e S2 ou S3 e S4 ativados: situação de *brake*.

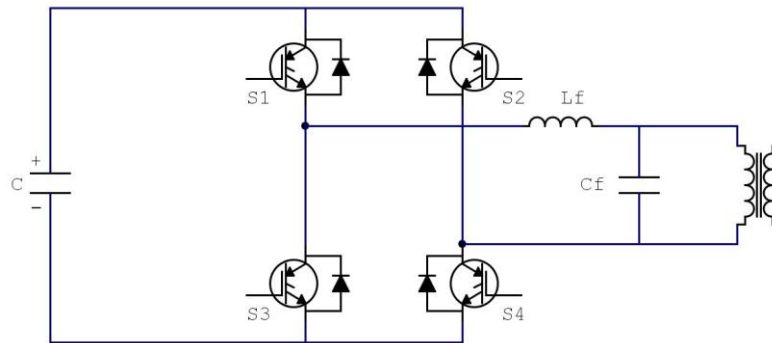


Figura 3.18: Conversor monofásico *full H-bridge* implementado com IGBT e díodos.

Quando não existem distúrbios na rede, o sistema de controle ativa alternadamente os dois modos de *brake*, acionando as restantes situações em casos de cavas e sobretensões. De modo a não ativar inadvertidamente os modos de carga e descarga do condensador, no método *feedforward* utilizado na geração de sinais, adicionou-se um bloco de *Dead Zone* para cortar o ruído decorrente do funcionamento do sistema, tendo-se adicionado ainda um controlador PI, ajustado empiricamente, para melhorar a magnitude da resposta. Segundo os ensaios de (Nogueira, 2010), o controle por SPWM revelou-se melhor que o método de histerese no controle de um DVR, pelo que foi a técnica de modelação utilizada nesta situação. Realça-se que a frequência de modelação aplicada foi de 9kHz, cumprindo desta forma as especificidades apresentadas na subsecção 2.4.1.

Na Figura 3.19 estão representados o sinal modulado e o sinal de referência calculado pelo método *feedforward*, para uma simulação efetuada com o sistema implementado (capítulo 4). Alguma da ondulação verificada nesta figura, quando o DVR não está a fornecer potência, deve-se às dinâmicas dos seus elementos constituintes.

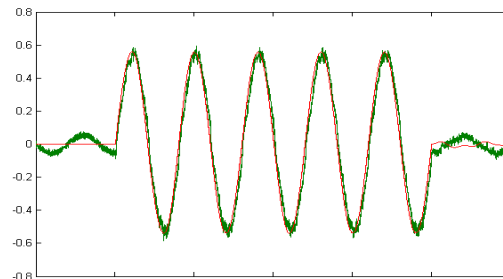


Figura 3.19: Sinal de referência calculado pelo método *feedforward* baseado na utilização de um circuito PLL (a vermelho) e, corrente na saída do DVR (a verde) para a fase correspondente.

3.4. Algoritmos de Detecção de Distúrbios

Diferentes distúrbios de tensão obrigam a diferentes modos de atuação, apenas na compensação de correntes harmônicas o sistema tem um funcionamento normal. Para cavas e sobretensões, o DVR fornece ou recebe energia da rede elétrica, pelo que só se torna necessário colocar o SMES em modo de descarga (por mais que um instante) aquando das primeiras. Interrupções são o tipo mais grave de cava, logo é igualmente fundamental colocar a bobina no modo de descarga, e dada a impossibilidade de se utilizar o conversor série, torna-se adicionalmente necessário alterar o modo de funcionamento do FAP. Em seguida serão vistos com maior detalhe os blocos responsáveis por efetuar estas tarefas no sistema implementado.

⇒ Cavas e Sobretensões

São vários os métodos existentes para fazer a deteção de cavas e sobretensões, de entre os mais comuns estão (Mansor & Nasrudin, 2011; Naidoo & Pragasen, 2007):

- Root Mean Square (RMS): A tensão e a corrente são analisadas no seu valor eficaz, necessitando para isso de um conjunto de amostras prévias. Estas, além de não corresponderem aos valores exatos da rede nesse momento requerem demasiadas ações de processamento.
- Análise da tensão de pico: A compensação só é iniciada após ser lido o valor máximo da onda nesse semiciclo.
- Missing Voltage: Trata a diferença entre o valor de tensão registado e o pretendido. Por possuir um PLL que monitoriza a frequência e fase de amostras antecessoras, torna-se mais eficiente que o RMS a detetar distúrbios que afetam a tensão, não só ao nível da magnitude, mas também ao nível da forma de onda. Contudo, os seus cálculos também são baseados em valores eficazes, pelo que o seu processamento é também relativamente lento.

Em (Mansor & Nasrudin, 2011) é apresentado um método que além de simples, permite a deteção de sub tensões (ou sobretensões) de forma significativamente mais rápida que nos métodos antes descritos. O seu princípio de funcionamento baseia-se na comparação do sinal sinusoidal de tensão da rede com um sinal de referência que possui o mesmo ângulo de fase e a amplitude em funcionamento nominal, tal como sucede no sistema de controlo do DVR implementado. O sinal de comando do DVR foi então utilizado como referência para o sistema de deteção de distúrbios. Contudo, para que a bobina não entre inadvertidamente em modo de descarga, torna-se ainda necessário separar as situações de cava das situações de sobretensão. Durante uma cava, como é necessário fornecer energia à rede, o sinal de referência do DVR encontra-se na mesma fase da tensão de entrada, estando em oposição de fase nas situações de sobretensão pois o DVR terá de absorver energia. A partir deste princípio desenvolveu-se o bloco responsável por fazer a distinção entre os dois distúrbios, e que se encontra ilustrado na Figura 3.20. Por o sistema implementado poder atuar sobre distúrbios em cada fase de forma independente, é requerido utilizar-se este bloco para cada uma das três fases.

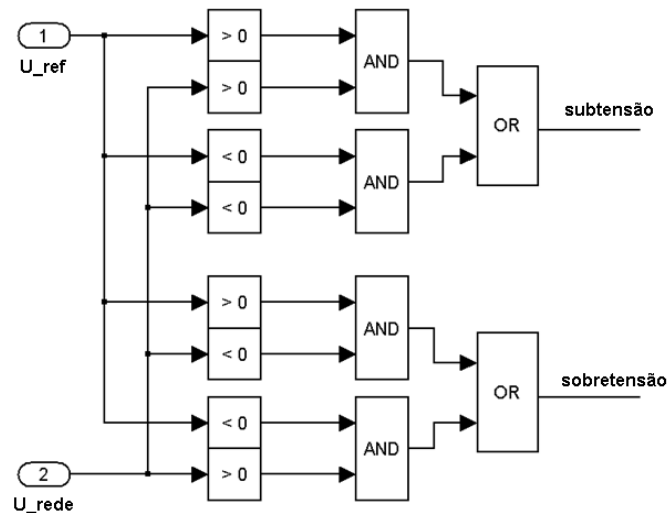


Figura 3.20: Bloco implementado para fazer a diferenciação entre subtensão e sobretensão.

⇒ Interrupções

Nesta unidade analisam-se os momentos em que a corrente na rede está nula. Inicialmente só se acionavam os mecanismos de resposta às interrupções quando a corrente nas três fases estava a zero no mesmo instante. Contudo verificou-se que corrente não cai simultaneamente em todas as fases. Neste sentido desenvolveu-se um algoritmo de forma agilizar o tempo de resposta, sendo o sistema implementado capaz de apenas responder a interrupções trifásicas, o seu funcionamento assenta no princípio de que basta uma das fases estar a zero por um certo número de amostras consecutivas para que seja considerado interrupção.

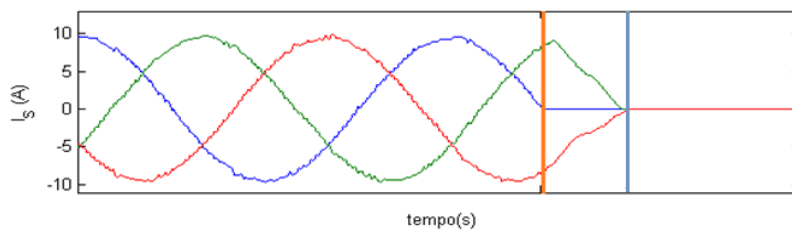


Figura 3.21: Corrente durante a transição para uma interrupção.

Na Figura 3.21 estão representados os momentos em que são detetadas as interrupções. A linha vertical a azul correspondente à abordagem inicial, correspondendo a linha a cor-de-laranja ao novo algoritmo.

3.5. Síntese do Capítulo

Neste capítulo descreveram os vários passos e os vários elementos considerados na constituição da topologia implementada.

Para distúrbios com magnitudes de 50% da tensão nominal e cargas com capacidade até 5 kW, procedeu-se ao dimensionamento dos três blocos principais sistema - filtro ativo paralelo, *Dynamic Voltage Restorer* e SMES – ajustando-se o seu funcionamento para os vários distúrbios ocorridos na rede elétrica

Por último, descreveu-se o sistema de deteção de distúrbios, explicando a ação deste componente na deteção das várias ocorrências, permitindo de forma autónoma à topologia implementada fazer a sua compensação.

4. Análise de Resultados

Os resultados aqui apresentados consideram o teste do sistema com quatro tipos de cargas trifásicas, de diferentes níveis de potência e comportamento harmónico.

Num primeiro ponto deste capítulo, são tecidas algumas considerações em relação às simulações realizadas. Numa segunda parte, são feitas várias análises para os diferentes tipos de carga: carga resistiva, carga não linear 1, carga não linear 2 e carga não linear 3. Para a carga puramente resistiva o sistema é testado considerando os principais distúrbios: filtragem de harmónicas de corrente, mitigação de cavas e sobretensões e sustento da rede em curtos períodos de interrupção total. Com exceção do caso monofásico, repete-se igual bateria de testes para a carga não linear 1, tendo sido analisado nas cargas não lineares 2 e 3 apenas situações de afundamentos e sobretensões. Em todas as cargas avaliou-se o desempenho do sistema em termos de magnitude e níveis de distorção harmónica, tendo sido feito nesta última situação avaliada, a comparação dos resultados obtidos com os limites impostos pela norma IEEE 519-1992.

4.1. Considerações Gerais

⇒ Cargas Utilizadas

Na escolha das cargas não lineares tentou-se reproduzir em termos de forma e nível de distorção harmónica, ondas características resultantes de alguns tipos de carga mais comuns. Neste processo, seguiu-se uma tabela apresentada em (Neto, 2009) baseada na norma IEEE 519-1992, e que dispõe de algumas das formas de onda mais usuais de cargas não lineares.

A primeira das ondas reproduzidas é referente à corrente de um conversor de seis pulsos com indutor de alto valor de filtragem. A Figura 4.1 ilustra a forma de onda gerada e a onda da norma. A taxa de distorção harmónica típica deste tipo de carga é de 28%, tendo sido obtida na onda gerada uma TDH também dessa ordem (ver Figura 4.2).

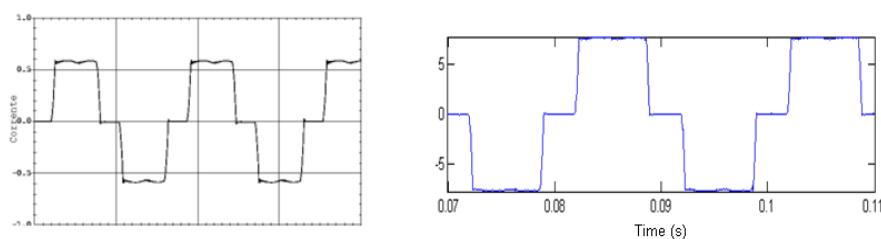


Figura 4.1: Onda típica de corrente de um conversor de 6 pulsos com indutor de alto valor de filtragem (à esquerda) e onda gerada (à direita).

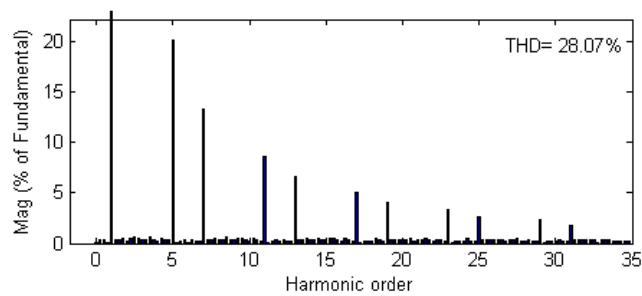


Figura 4.2: Espectro harmônico e THD total da onda gerada na carga não linear 1.

Para a segunda carga não linear tentou-se reproduzir a corrente gerada por um conversor de seis pulsos com um condensador de filtragem de baixa capacidade e um indutor série de filtragem. Este tipo de onda, representado na Figura 4.3, tem valores de THD até 40%, estando na Figura 4.4 ilustrado o espectro harmônico da onda gerada.

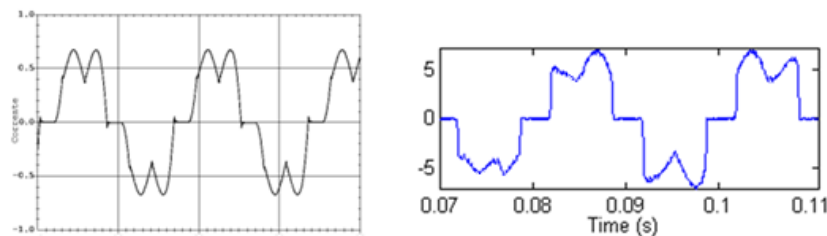


Figura 4.3: Onda típica de corrente de um conversor de 6 pulsos com condensador de filtragem e indutor série de filtragem (à esquerda) e onda gerada (à direita).

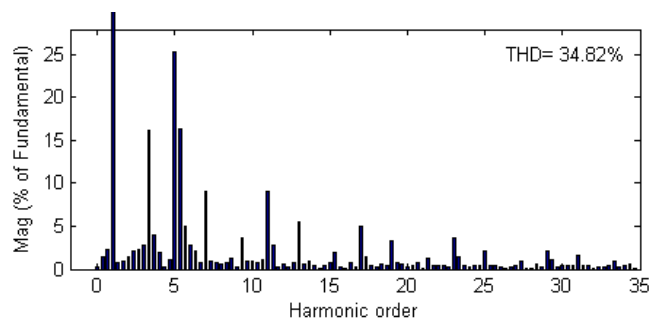


Figura 4.4: Espectro harmônico e THD total da onda gerada na carga não linear 2.

Conforme ilustrado na Figura 4.5, a carga não linear número três corresponde a um conversor de seis pulsos com apenas condensador de filtragem.

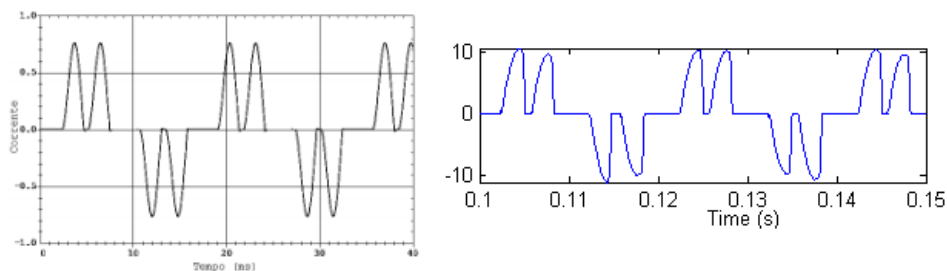


Figura 4.5: Onda típica de corrente de um conversor de 6 pulsos com condensador de filtragem (à esquerda) e onda gerada (à direita).

A magnitude da distorção harmónica deste tipo de carga vai até aproximadamente 80%, tendo-se obtido na carga utilizada um valor bastante próximo, tal como representado na Figura 4.6.

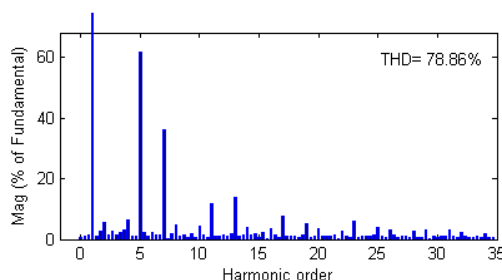


Figura 4.6: Espectro harmónico e THD total da onda gerada na carga não linear 3.

⇒ Filtro Passivo

Aquando das simulações com as cargas não lineares verificou-se a existência de algum conteúdo harmónico mais significativo nas mais altas frequências, tanto da tensão na carga, como na corrente da rede. De forma a assegurar o cumprimento da norma IEEE 519-1992, decidiu-se implementar um filtro passivo amortecido de segunda ordem. Aqui, seguindo-se as indicações retratadas na subsecção 2.2.1, obteve-se $R = 26 \, \Omega$, $L = 12 \, \text{mH}$ e $C = 5 \, \mu\text{F}$.

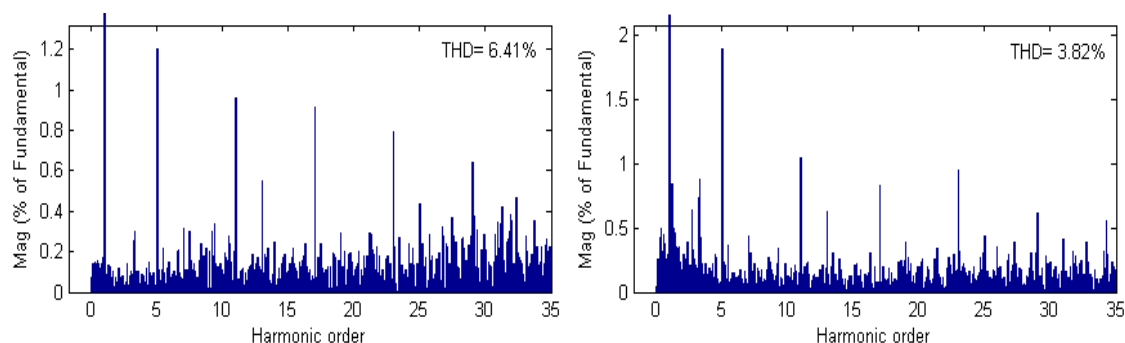


Figura 4.7: Espectro harmónico e THD total, na tensão de carga (à esquerda) e na corrente da rede (à direita).

Na Figura 4.7 está representado o espectro harmónico da carga não linear 2 durante o seu funcionamento normal, antes da implementação deste elemento passivo de filtragem. O espectro harmónico obtido após a aplicação do filtro é apresentado aquando da análise desta carga (secção 4.2.3).

⇒ Magnitudes Analisadas

Nas várias simulações que envolvem cavas e sobretensões, testou-se o sistema no limite do seu dimensionamento, ou seja, 50% abaixo (ou acima) da tensão nominal da rede elétrica. Quanto à duração, escolheu-se o valor intermédio do patamar até onde se verificam os afundamentos de tensão mais comuns, ou seja, 0.3 ms, tal como ilustrado pela Figura 2.1. No entanto, para se ter uma maior ideia da capacidade de resposta do sistema, estão ilustradas na Figura 4.8 as curvas de descarga da corrente na bobina supercondutora para sub tensões trifásicas com magnitudes entre 20 e 50% da tensão nominal da rede, numa carga puramente resistiva de 5 kW. Nesta mesma figura, pode-se ver ainda a representação para a interrupção total. Repetiu-se este procedimento para uma

carga de 2,5 kW, também puramente resistiva (Figura 4.9). Ao comparar-se os dois casos, verificou-se que apesar de uma das cargas possuir metade da potência da outra, o sistema não garante o dobro do tempo de compensação. Esta situação torna-se mais evidente, quanto maior é o distúrbio.

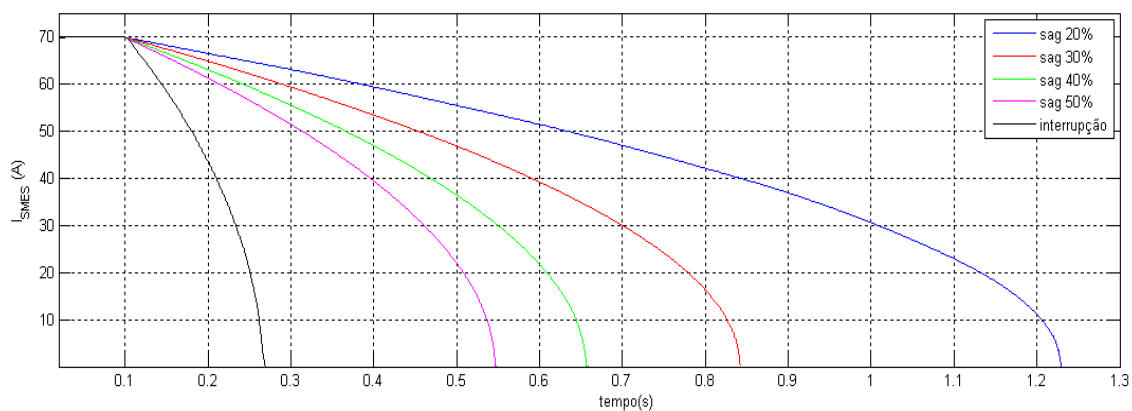


Figura 4.8: Evolução da corrente na bobina SC para uma carga resistiva de 5 kW sob diferentes magnitudes de cavas.

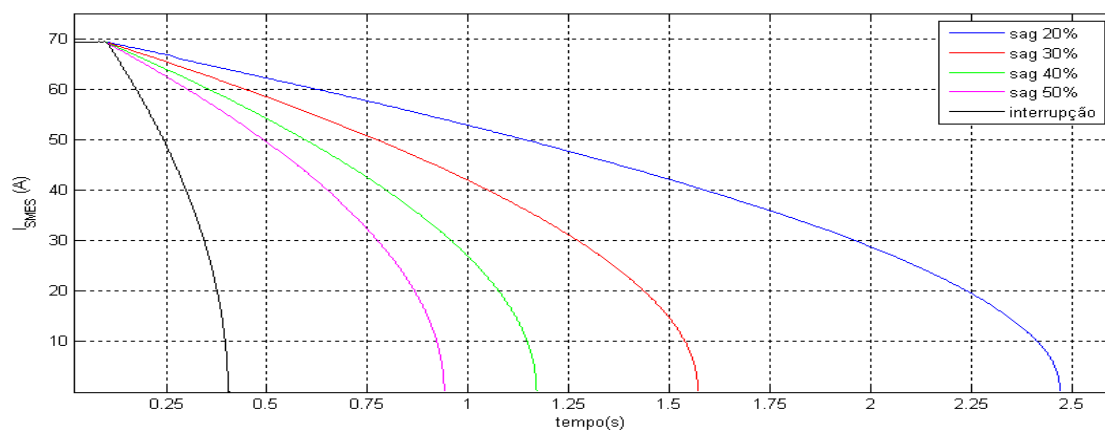


Figura 4.9: Evolução da corrente na bobina SC para uma carga resistiva de 2,5 kW sob diferentes magnitudes de cavas.

4.2. Análise de resultados

4.2.1. Carga Resistiva

Neste segmento foi analisada uma carga puramente resistiva de 4,5 kW. Por se tratar um processo lento em termos de simulação, considera-se a bobina supercondutora já estando inicialmente carregada. Como termo de controlo, é apresentado na Figura 4.10 o espectro harmónico da fase A desta carga sem nenhum distúrbio. Ainda que se trate de uma carga puramente resistiva é verificado algum conteúdo harmónico, possível de se justificar pela presença de elementos não lineares no sistema.

Para as simulações das seguintes subsecções, considera-se igualmente no início a bobina carregada, assim como o espectro harmónico analisado ser da fase A.

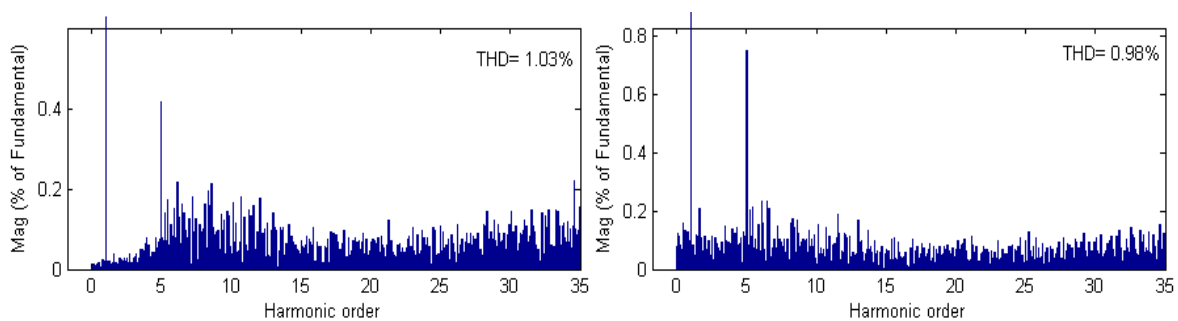


Figura 4.10: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), para a carga resistiva em funcionamento normal.

⇒ Subtensão Monofásica

Na Figura 4.11 são apresentados os resultados obtidos na compensação deste tipo de distúrbio. Apesar de serem o tipo de afundamento mais comum, segundo (Middlekauff & Collins, 1998) representam cerca de 66% das cavas verificadas em sistemas de energia, porém apresentam uma menor gravidade, quando comparados com os sentidos em mais que uma fase simultaneamente. Como se verá visto mais à frente, o sistema implementado possui a capacidade de atenuar distúrbios trifásicos, pelo que compensações monofásicas não serão mais testadas. Contudo, através destas simulações comprova-se a capacidade que o sistema possui de mitigar distúrbios numa só fase, razão pela qual se utilizou a configuração com transformadores monofásicos no compensador série.

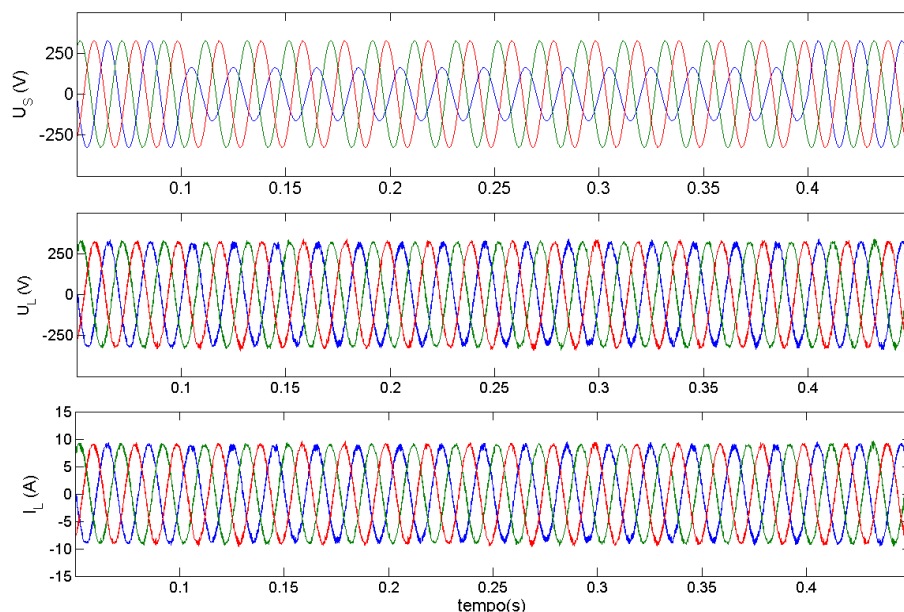


Figura 4.11: Tensão na rede (em cima), tensão na carga (ao centro) e corrente na carga (em baixo) durante uma cava de tensão monofásica.

⇒ Subtensão Trifásica

Inversamente ao que sucede com as subtensões monofásicas, as trifásicas, são as menos comuns, contudo também as de maior gravidade. Nas próximas três figuras, são apresentadas as magnitudes das ondas de corrente e tensão, tanto no lado da carga como no lado rede (Figura 4.12). É ainda analisado espectro harmónico da corrente na carga e tensão na rede durante o tempo da subtensão (Figura 4.13), bem como da evolução da tensão no barramento e corrente na bobina SC (Figura 4.14).

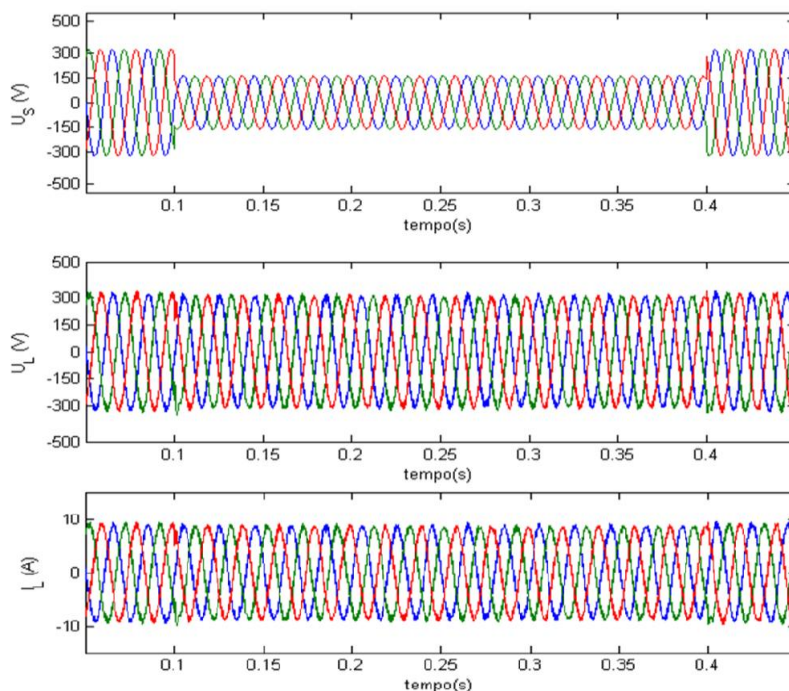


Figura 4.12: Tensão na rede (em cima), tensão na carga (ao centro) e corrente na carga (em baixo) durante uma cava de tensão trifásica.

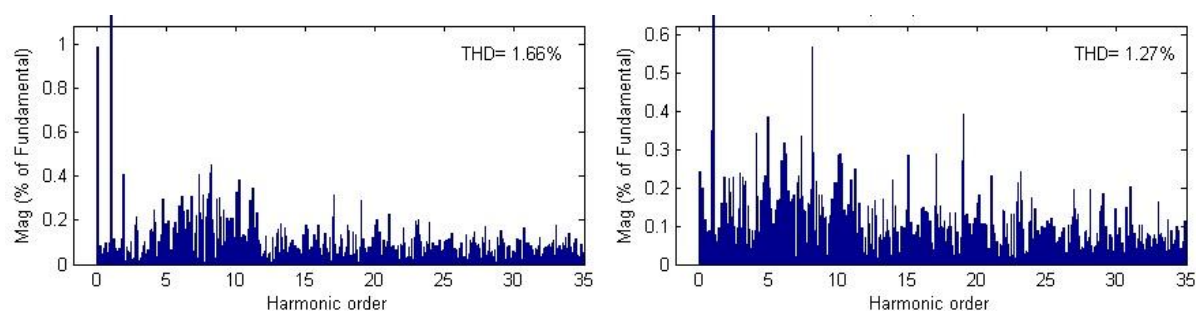


Figura 4.13: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), durante o distúrbio de tensão.

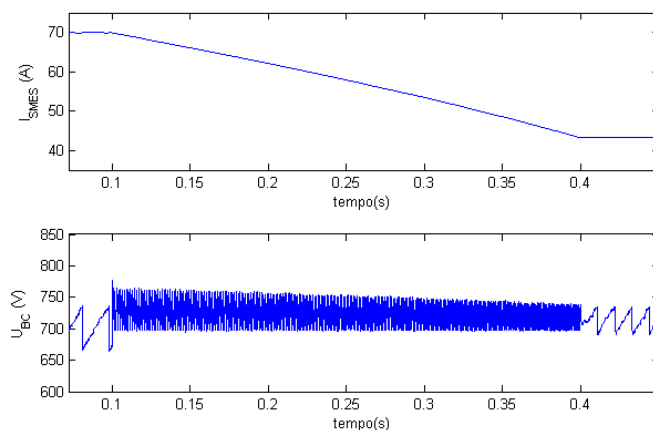


Figura 4.14: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).

Os resultados verificados são bastante satisfatórios, quer em termos de conteúdo harmónico, quer em termos magnitude e forma de onda. Porém, observando-se com maior rigor a Figura 4.14, percebe-se a existência de um *ripple* de tensão no barramento relativamente elevado no início do distúrbio. Este facto supõe a existência de uma libertação excessiva de energia do SMES, principalmente numa fase inicial.

⇒ **Sobretensão Trifásica**

Nas sobretensões trifásicas analisaram-se os mesmos parâmetros que nas cavas trifásicas, com resultados ilustrados nas quatro imagens seguintes.

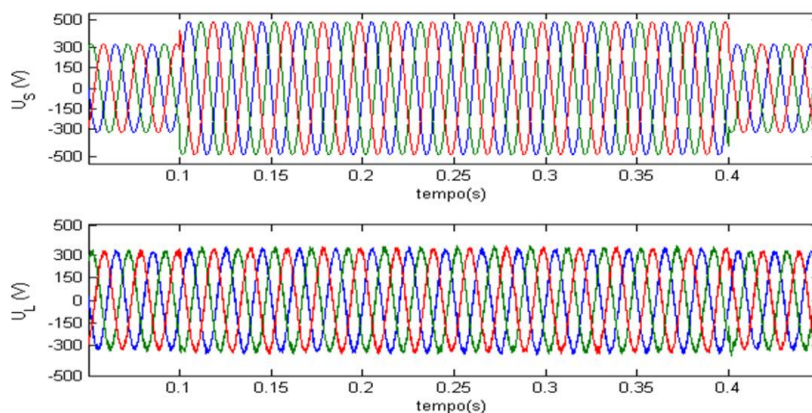


Figura 4.15: Tensão na rede (em cima) e tensão na carga (em baixo) durante uma sobretensão trifásica.

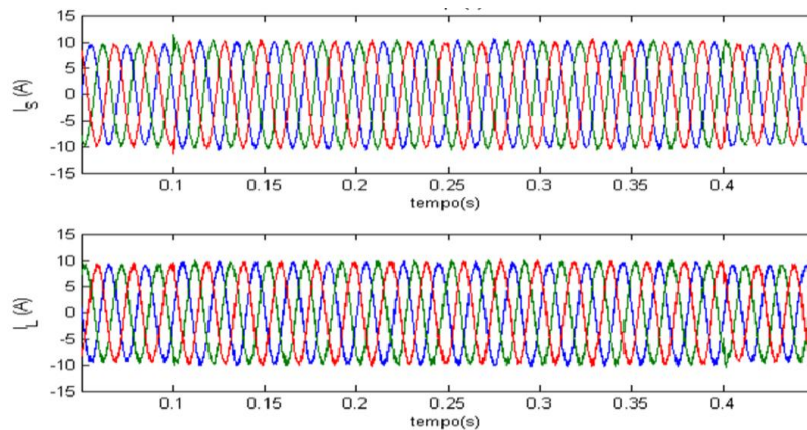


Figura 4.16: Corrente na rede (em cima) e corrente na carga (em baixo) durante uma sobretensão trifásica.

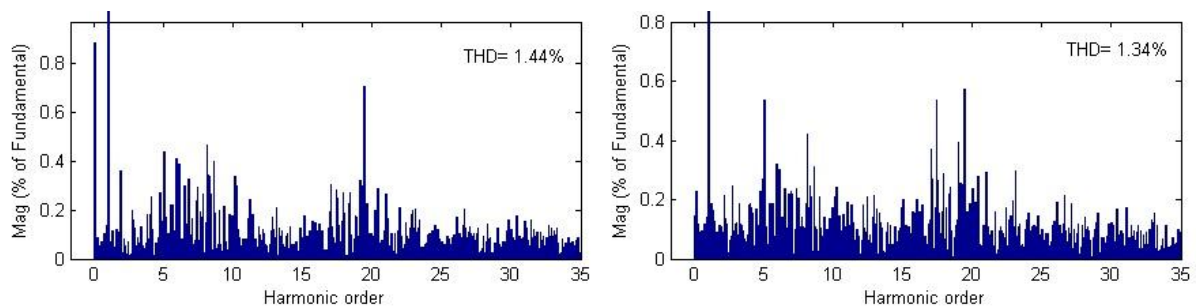


Figura 4.17: Espectro harmônico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), durante o distúrbio de tensão.

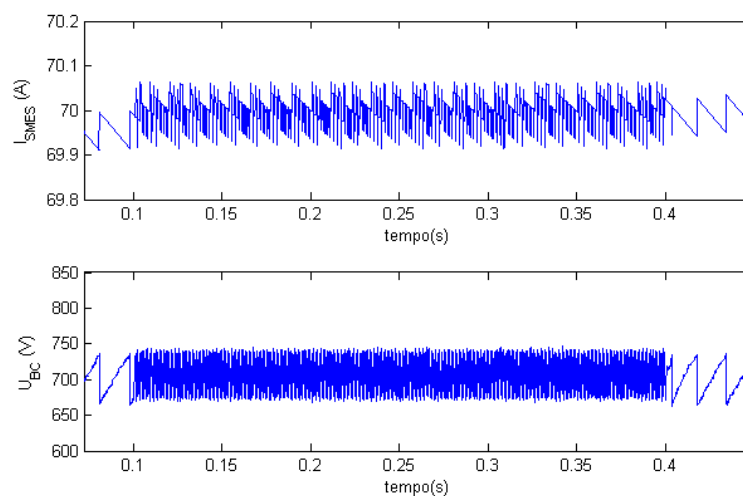


Figura 4.18: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).

Mais uma vez verificou-se um bom comportamento do sistema. Quer ao nível de distorção harmônica, quer em termos de magnitudes de onda. Ao contrário do caso anterior, não se verificaram alterações nos níveis de *ripple* no próprio barramento ao longo do tempo. Desta forma foi possível atestar a boa eficácia do método implementado de controlo de sobretensões. O sistema não alterou a sua dinâmica de funcionamento, mesmo com uma sobretensão de 1,5 vezes acima da tensão de funcionamento normal da rede. Indo muito além dos 10% apontados por (Pregitzer, 2006), como sendo a ordem de grandeza das sobretensões que o DVR consegue compensar.

⇒ Interrupção Total

A única alteração relativamente ao procedimento das situações anteriores foi ao nível do tempo de duração da perturbação. Com uma aproximação à curva da Figura 4.8 verifica-se que uma duração de 0,3 s não dá para ser compensada, pelo que aqui se analisou uma interrupção com metade do tempo.

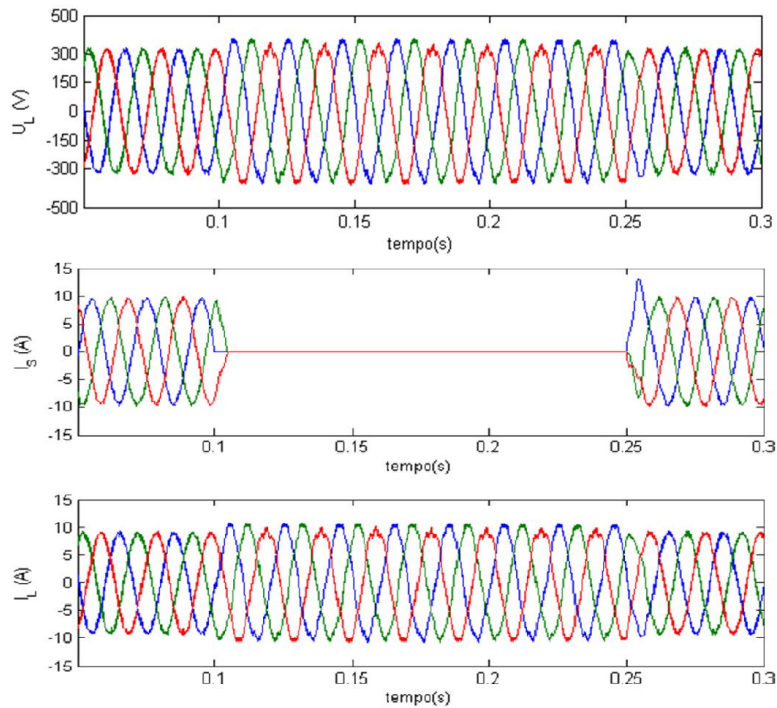


Figura 4.19: Tensão na carga (em cima), corrente na rede (ao centro) e corrente na carga (em baixo) durante uma interrupção total.

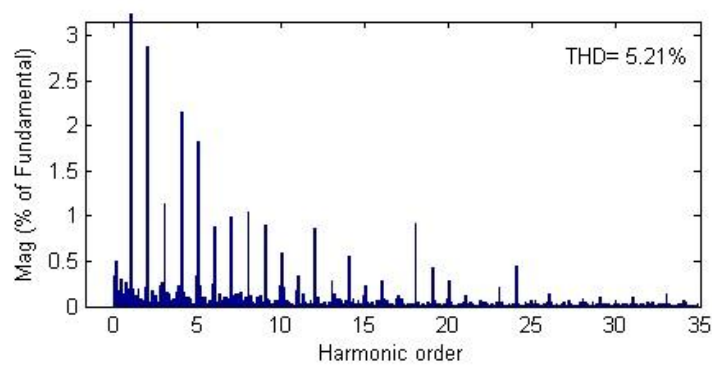


Figura 4.20: Espectro harmónico da tensão e corrente na carga, durante o distúrbio de tensão.

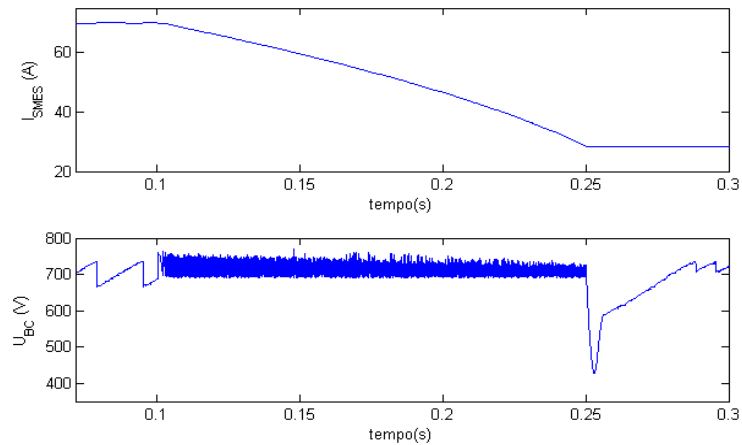


Figura 4.21: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).

Por esta ser a perturbação mais grave era de prever que se obtivessem os piores resultados. Em termos de magnitude das ondas compensadas, verificaram-se ligeiras sobretensões e sobrecorrentes na carga. Na base deste fornecimento excessivo de energia poderá estar não só a menor apetência que o FAP tem para fazer a compensação de distúrbios de tensão, como uma menor eficiência dos controladores, pois o seu ajustamento foi feito com o intuito de se compensarem os principais distúrbios de distorção da rede (cavas e sobretensões). Ainda assim, os valores em causa estão praticamente dentro do intervalo de 10% admitido como funcionamento normal da rede elétrica.

A queda mais abrupta da tensão do barramento, visível na Figura 4.21 logo após findar a interrupção, deve-se precisamente ao algoritmo implementado para fazer a atenuação dos transitórios. Este valor chega mesmo a transpor o limite mínimo de tensão que deve estar presente no barramento, contudo pela sua curta duração, não foi considerado relevante.

Ao nível da distorção harmónica é verificado que o seu valor total está ligeiramente acima dos limites estipulados pela norma IEEE 519-1992. Na origem deste valor poderá estar alguma ressonância indesejada oriunda de um elemento passivo de filtragem.

4.2.2. Carga Não Linear 1

Nesta subsecção é testado o funcionamento do sistema com recurso a uma carga não linear com aproximadamente 4,3 kV. Na Figura 4.7 foi analisado o espectro harmónico desta carga em funcionamento normal sem o filtro passivo. Aplicado o filtro, obtém-se em funcionamento normal as formas de onda da Figura 4.22 e cujo espectro harmónico é mostrado na Figura 4.23. Como se pode constatar a distorção harmónica nesta carga passou de níveis iniciais de 28% (Figura 4.1), para valores abaixo de 4%, respeitando a norma IEEE 512-1992 em todo o seu espectro.

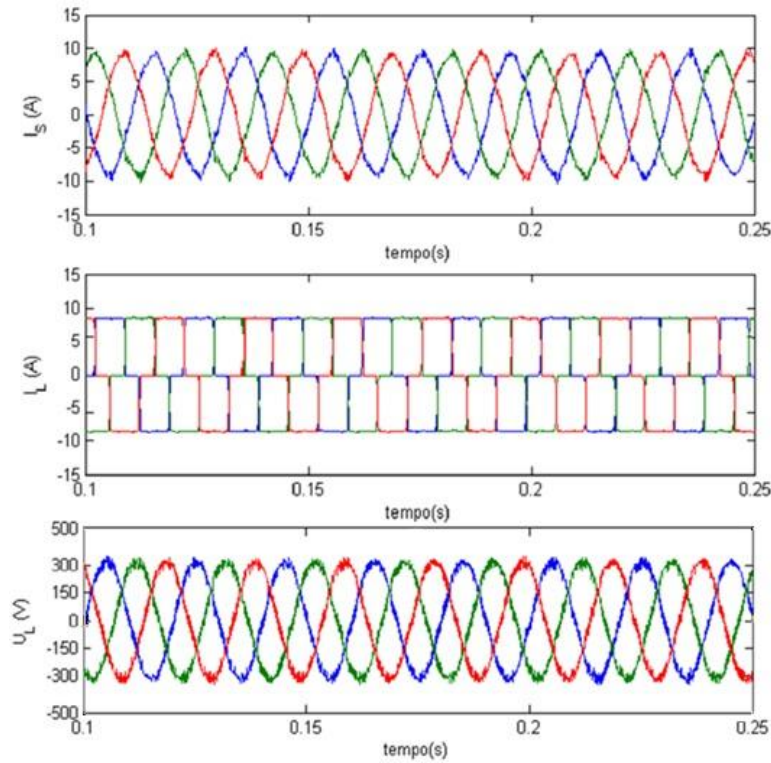


Figura 4.22: Corrente na rede (em cima), corrente na carga (ao centro) e tensão na carga (em baixo).

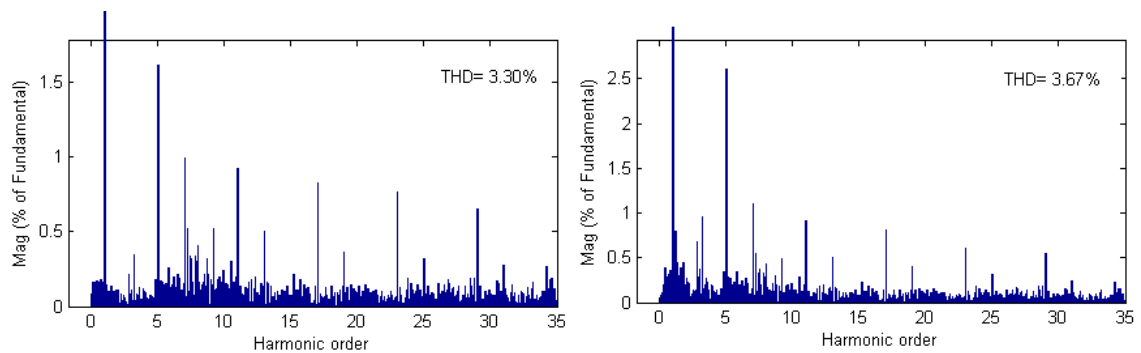


Figura 4.23: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita).

As cargas não lineares caracterizam-se por aumentar o conteúdo da potência reativa na rede elétrica, e cabe ao conversor paralelo a responsabilidade de atenuar este efeito. Na Figura 4.24 é mostrado o comportamento das potências reativas, no lado da carga (Q_{CARGA}) e no lado da rede elétrica (Q_{REDE}), ao longo do tempo. Até aos 0,15 s o FAP encontra-se desligado, como se pode

observar ambas potências apresentam níveis bastante aproximados. A pequena diferença verificada deve-se essencialmente ao filtro passivo utilizado. Quando ligado, o conversor paralelo faz decair a potência reativa da rede para cerca de 1/3 do valor registado na carga. O pico de potência verificado nesta mesma figura deve-se a transitórios decorrentes do momento em que o conversor paralelo é ligado, o que em funcionamento normal não acontece, pois o FAP estará sempre ligado.

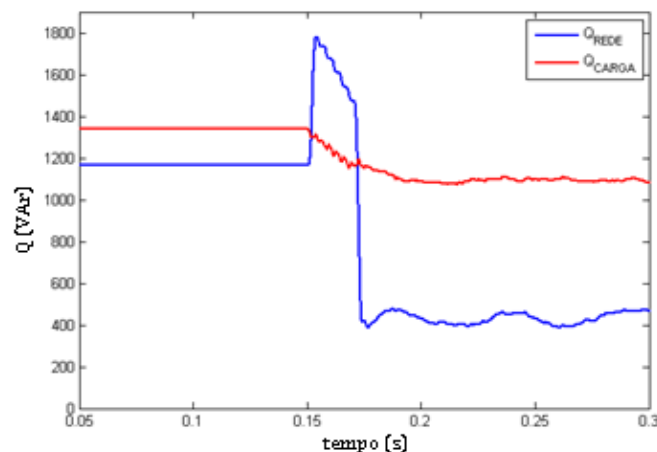


Figura 4.24: Evolução da potência reativa na carga e na rede elétrica, com e sem o FAP ligado.

⇒ Subtensão Trifásica

A análise efetuada é em tudo similar à realizada para o mesmo distúrbio na carga resistiva. Como poderá ser constatado nas quatro figuras seguintes, os resultados são igualmente similares com os obtidos no ensaio anterior correspondente. Apenas se constou um pequeno aumento no *ripple* da tensão do barramento, mas que ainda assim não alterou os níveis de distorção harmónica verificados durante o distúrbio.

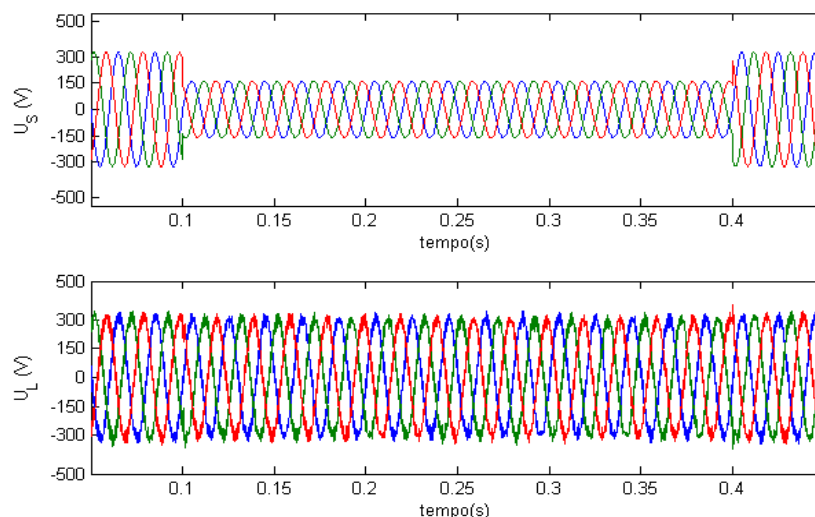


Figura 4.25: Tensão na rede (em cima) e tensão na carga (em baixo) durante uma cava de tensão trifásica.

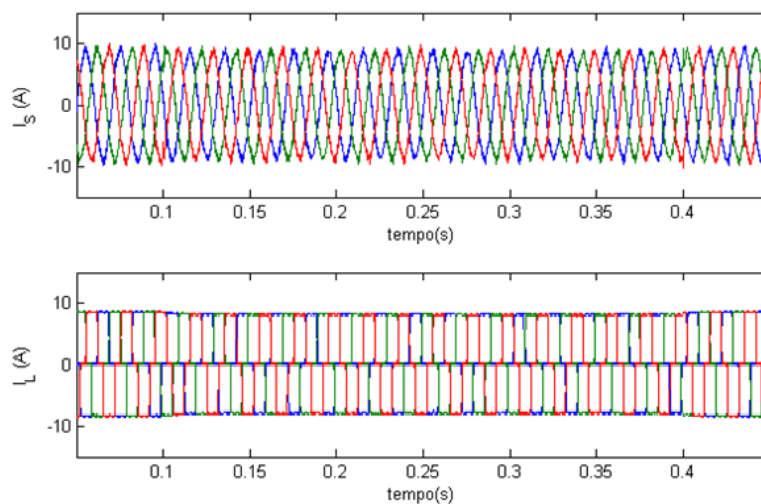


Figura 4.26: Corrente na rede (em cima) e corrente na carga (em baixo) durante uma cava de tensão trifásica.

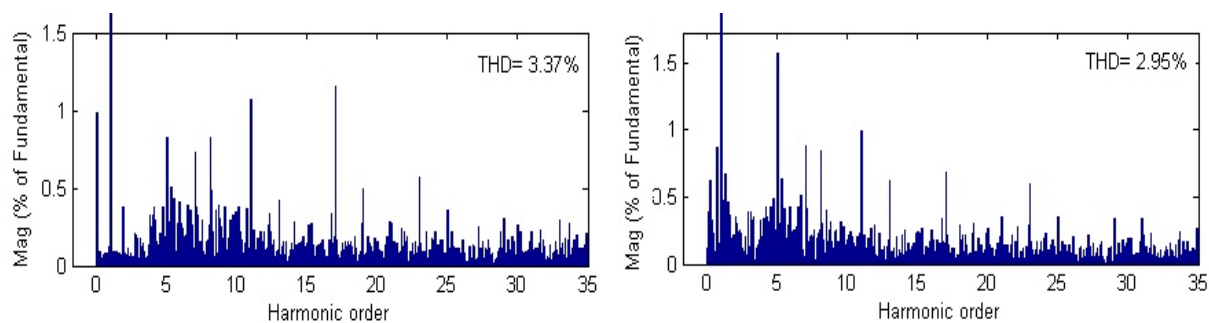


Figura 4.27: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), durante o distúrbio de tensão.

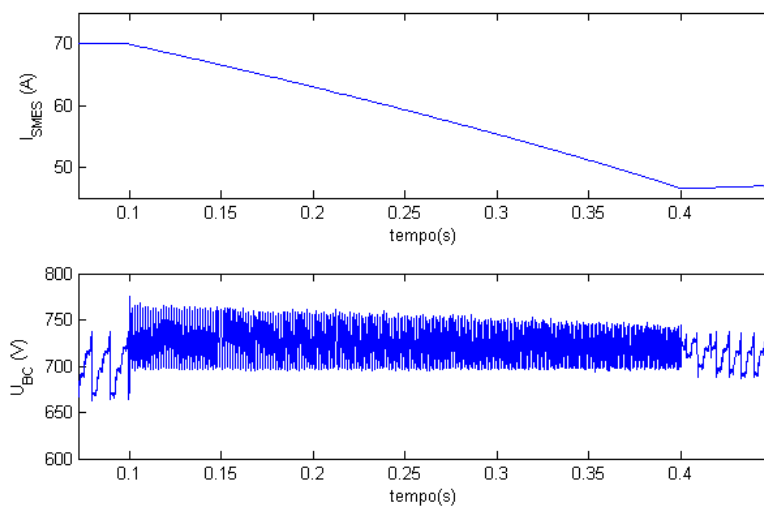


Figura 4.28: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).

⇒ Sobretensão Trifásica

Mantiveram-se os moldes da simulação anterior, tendo-se obtido para a situação de sobretensão as formas de onda e níveis de conteúdo harmónico apresentados nas figuras seguintes.

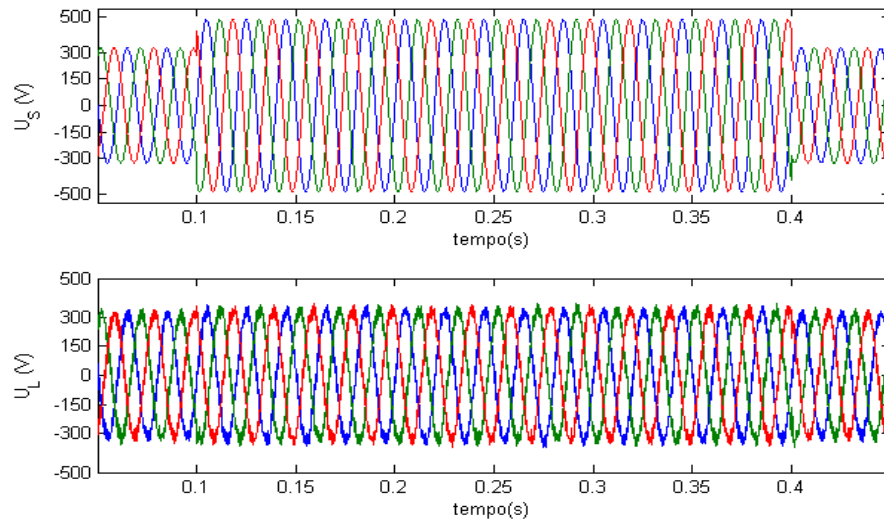


Figura 4.29: Tensão na rede (em cima) e tensão na carga (em baixo) durante uma sobretensão trifásica.

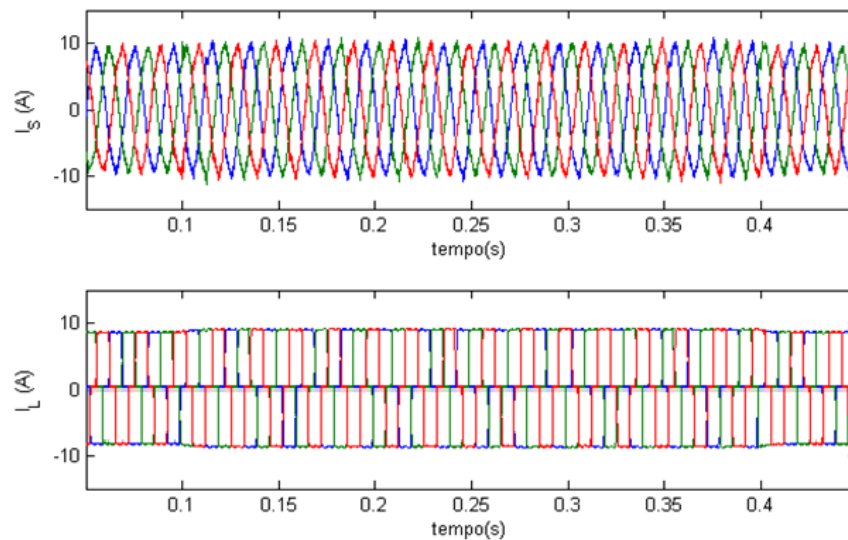


Figura 4.30: Corrente na rede (em cima) e corrente na carga (em baixo) durante uma sobretensão trifásica.

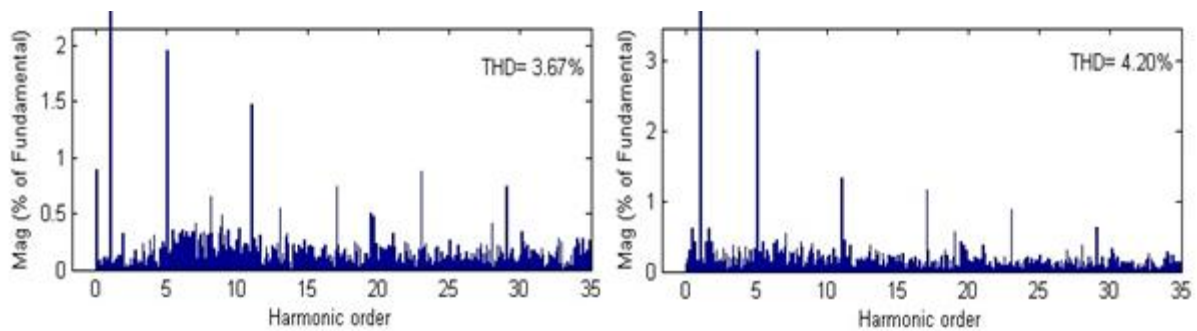


Figura 4.31: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), durante o distúrbio de tensão.

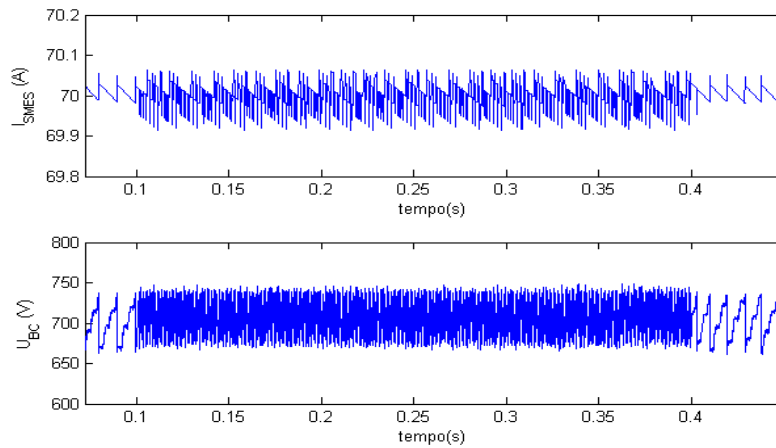


Figura 4.32: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).

Mais uma vez os resultados obtidos demonstraram ser globalmente bastante satisfatórios. Contudo, através de uma análise mais detalhada verifica-se no espectro da corrente que a 23ª harmónica, embora ligeiramente, supera o valor de 0,6 definido pela norma IEEE utilizada como termo de comparação.

⇒ Interrupção Total

É novamente na perturbação mais extrema que se verificam os piores desempenhos do sistema. Embora aqui já fosse uma situação espectável, dado que durante uma interrupção o filtro ativo paralelo deixa fazer a compensação de harmónicas, limitando-se apenas a debitar potência ativa na carga, razão pela qual este distúrbio não será mais analisado em cargas não lineares.

Como se pode constatar pela Figura 4.33, a tarefa de manter a corrente até é conseguida, no entanto as carências de filtragem levam a grandes distorções da tensão da própria carga (Figura 4.34). Já ao nível do *DC Link*, tanto bobina como condensador, verificaram um comportamento similar ao registado aquando da interrupção com a carga puramente resistiva, tal como ilustrado na Figura 4.35.

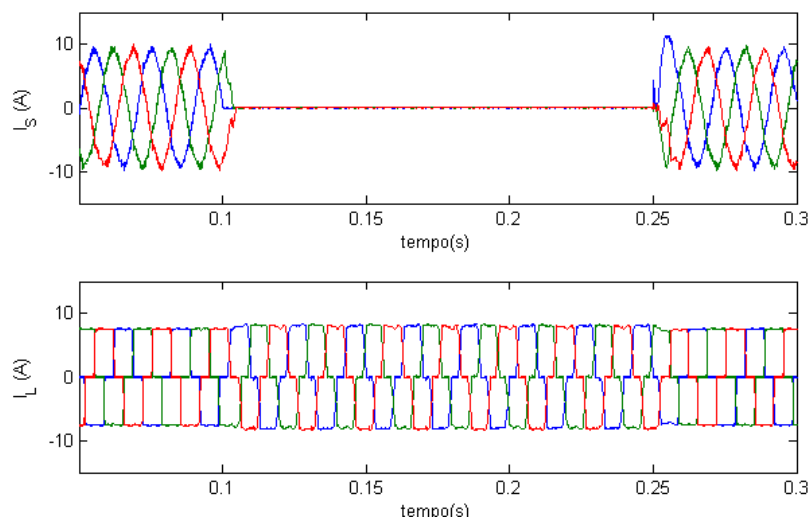


Figura 4.33: Corrente na rede (em cima) e corrente na carga (em baixo) durante uma interrupção total.

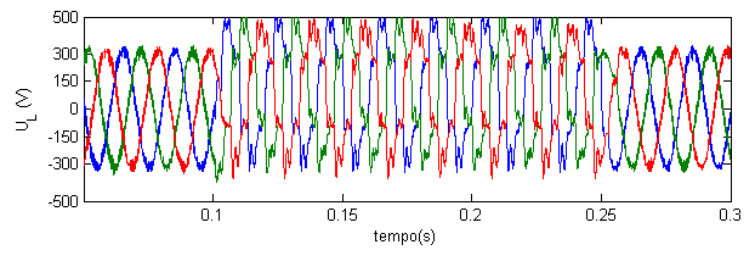


Figura 4.34: Tensão na carga durante uma interrupção total.

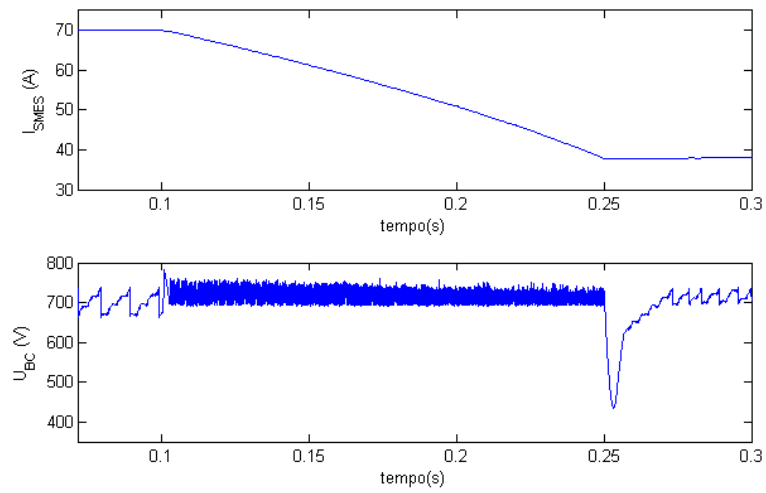


Figura 4.35: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).

4.2.3. Carga Não Linear 2

Através dos mesmos procedimentos das simulações anteriores, nesta subsecção é avaliado o desempenho do sistema perante uma outra carga não linear, mais concretamente uma carga de aproximadamente 3 kV e com algum conteúdo capacitivo.

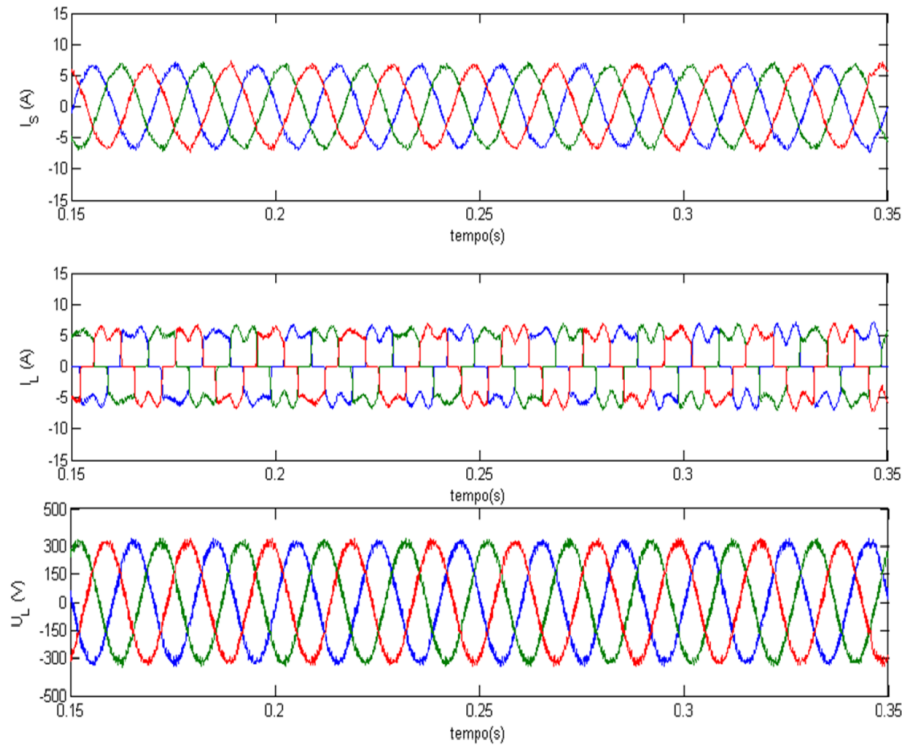


Figura 4.36: Corrente na rede (em cima), corrente na carga (ao centro) e tensão na carga (em baixo).

Na Figura 4.36 está patente o desempenho do sistema sem a ocorrência de distúrbios, onde para a tensão na carga e corrente na rede se obtiveram os valores de distorção harmónica indicados na Figura 4.37. Comparando com o espectro inicial (Figura 4.3) torna-se evidente a ação de filtragem do sistema, passando-se de níveis de distorção harmónica acima de 30% na corrente da rede, para valores em torno dos 3%.

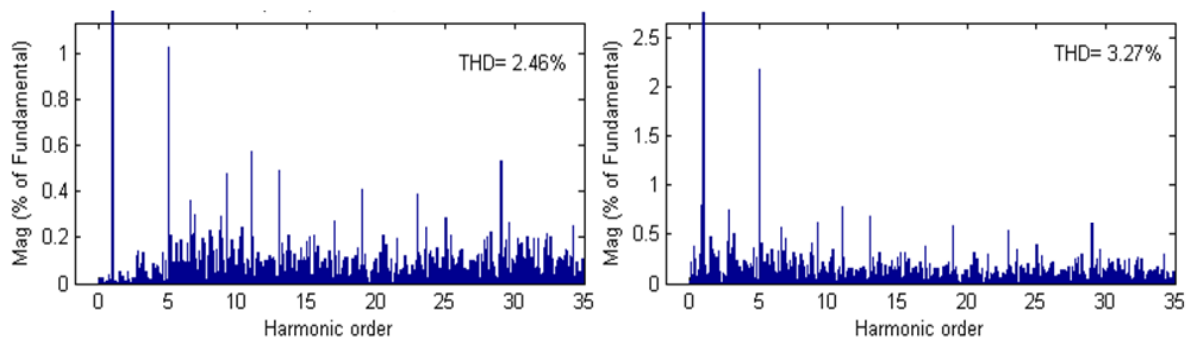


Figura 4.37: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), para a carga não linear 2 em funcionamento normal.

À semelhança do que sucedeu para a carga não linear 1 analisou-se da ação do filtro ativo paralelo na compensação da potência reativa (Figura 4.36), onde se verificou que mais uma vez o FAP fez decair a potência reativa da rede para cerca de 1/3 do valor registado na carga. Aqui, verifica-se porém que a ação de compensação do filtro ativo é simultaneamente causadora de variações relativamente pequenas no valor da potência reativa no lado da carga, contudo este efeito não é passado para rede elétrica.

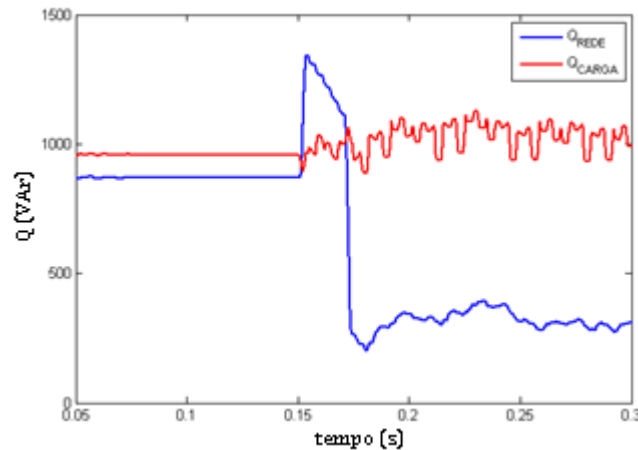


Figura 4.38: Evolução da potência reativa na carga e na rede elétrica, com e sem o FAP ligado.

⇒ Subtensão Trifásica

Como poderá ser percecionado pelos resultados apresentados, nas próximas quatro figuras mais uma vez se verificou que em situações de afundamentos de tensão o sistema implementado dá uma boa resposta. Nos sinais compensados registaram-se formas de onda aproximadas às do funcionamento com a carga puramente resistiva, resultando em baixos níveis de distorção harmónica.

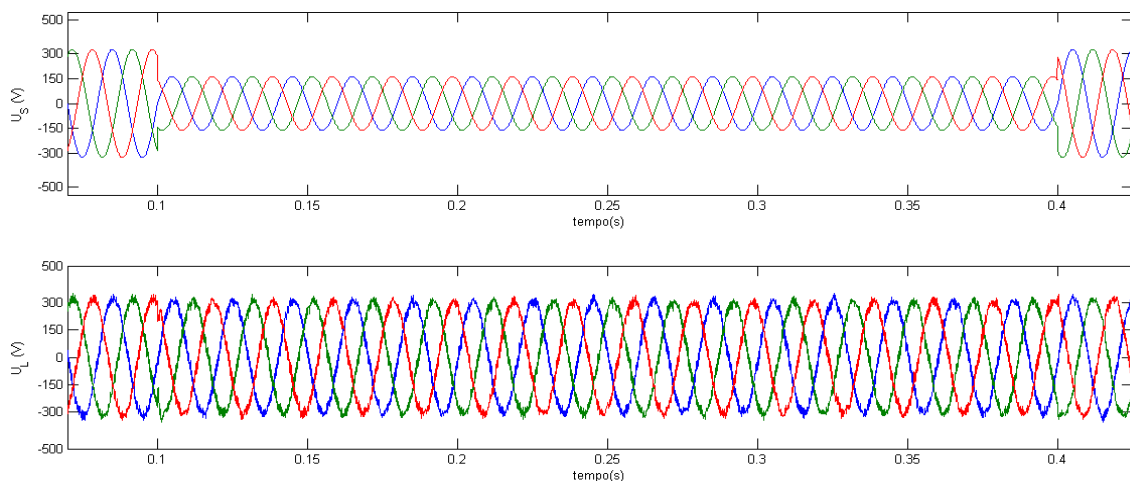


Figura 4.39: Tensão na rede (em cima) e na carga (em baixo) durante uma cava de tensão trifásica.

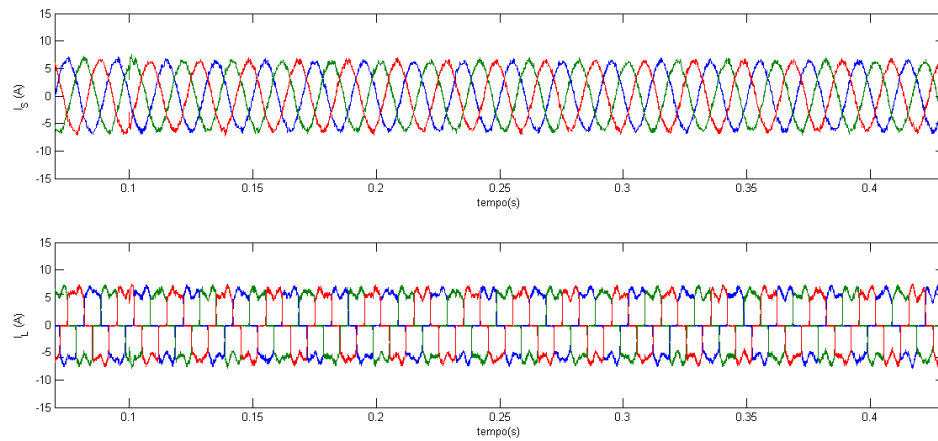


Figura 4.40: Corrente na rede (em cima) e na carga (em baixo) durante uma cava tensão trifásica.

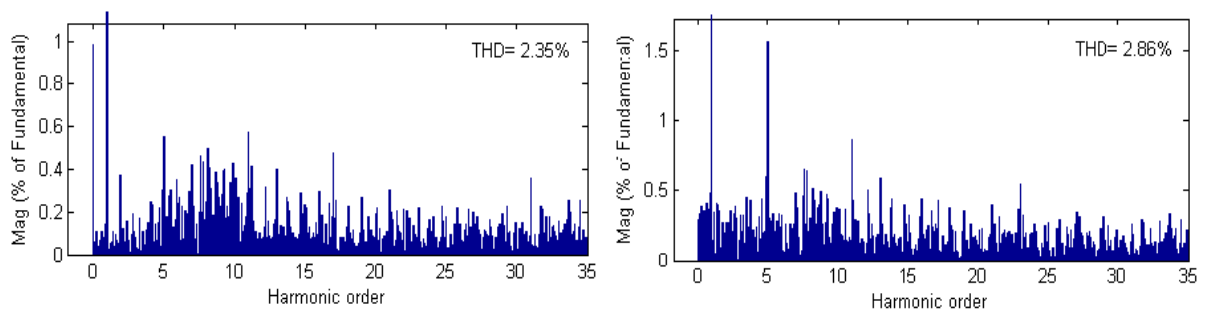


Figura 4.41: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), durante o distúrbio de tensão.

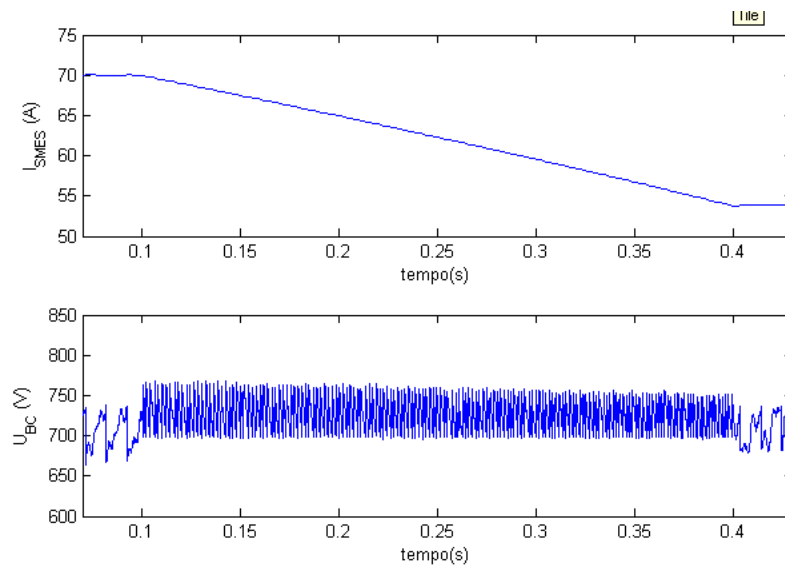


Figura 4.42: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).

⇒ Sobretensão Trifásica

A concisão dos resultados verificados na compensação de afundamentos de tensão, antevê que também na resposta a sobretensões o sistema apresente um bom desempenho, situação que se veio a comprovar tal como ilustrado pelas próximas imagens. Apenas na tensão do barramento foi verificado algum *ripple* de maior magnitude, nos momentos que sucederam a compensação.

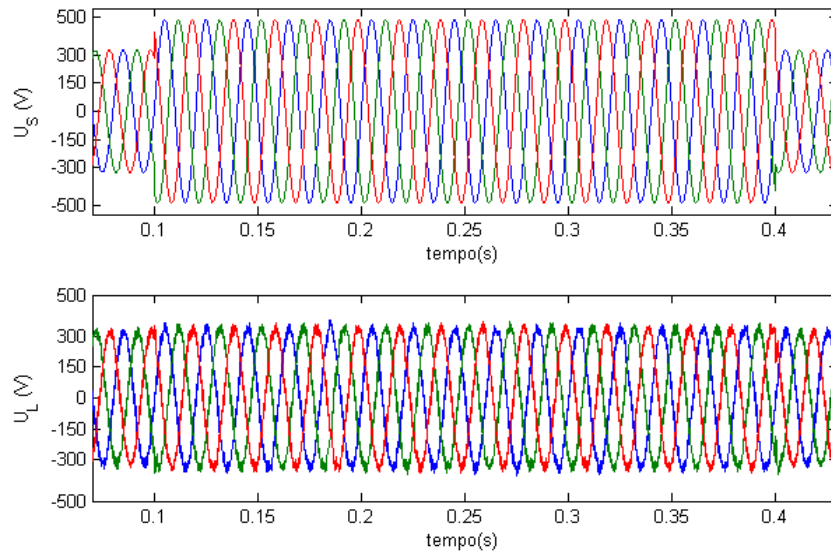


Figura 4.43: Tensão na rede (em cima) e na carga (em baixo) durante uma sobretensão trifásica.

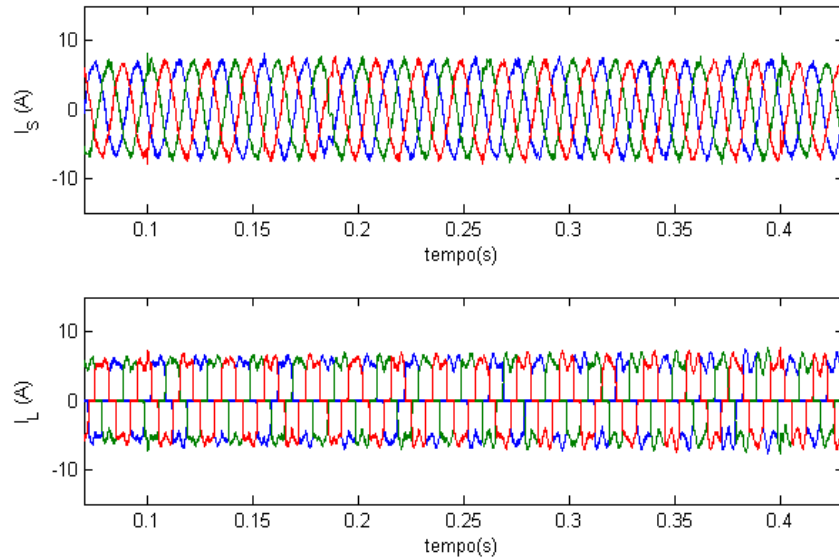


Figura 4.44: Corrente na rede (em cima) e na carga (em baixo) durante uma sobretensão trifásica.

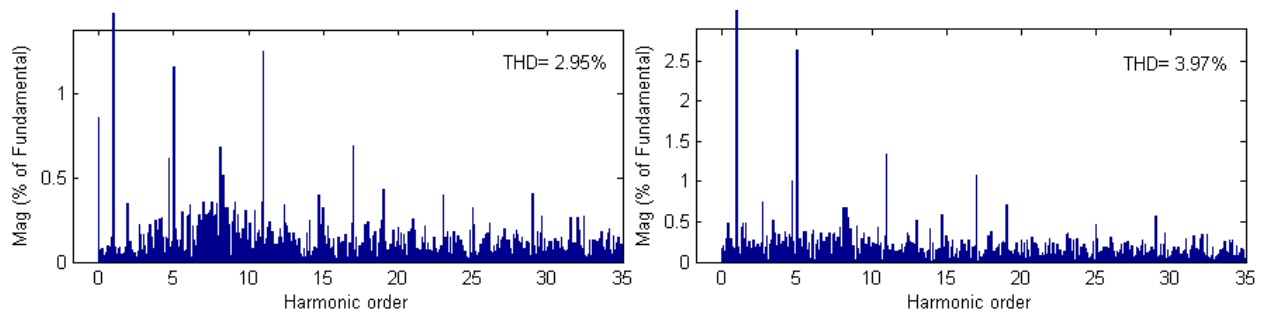


Figura 4.45: Espectro harmônico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita).

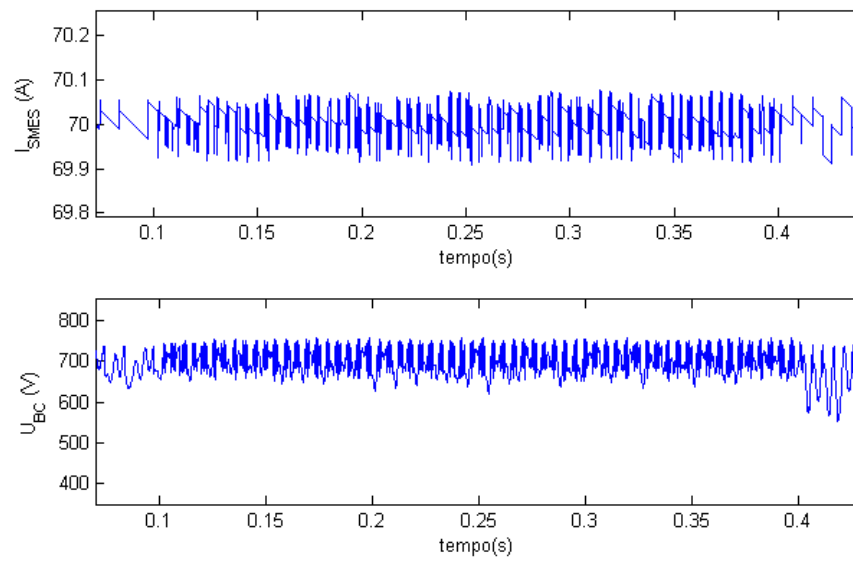


Figura 4.46: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).

4.2.4. Carga Não Linear 3

No último ensaio, subiu-se em relação à carga não linear 2, a potência ativa da carga, passando para 3,75 kW. Apesar deste tipo de carga apresentar um conteúdo harmónico próximo de 80% (Figura 4.6), o sistema implementado levou-o até níveis inferiores a 10%, que ainda assim não permite o cumprimento da norma IEEE 519-1992. Como se pode verificar no espectro harmónico da Figura 4.47, é grande a magnitude verificada nas baixas frequências, nomeadamente na 5ª e 7ª harmónica. Nestas duas harmónicas procedeu-se à aplicação de um filtro sincronizado seguindo-se os passos da secção 2.2.1. O espectro harmónico decorrente desta filtragem encontra-se na Figura 4.49, sendo possível verificar que os sinais de tensão e corrente já se enquadram dentro da norma, estando as formas de onda correspondentes representadas na Figura 4.48.

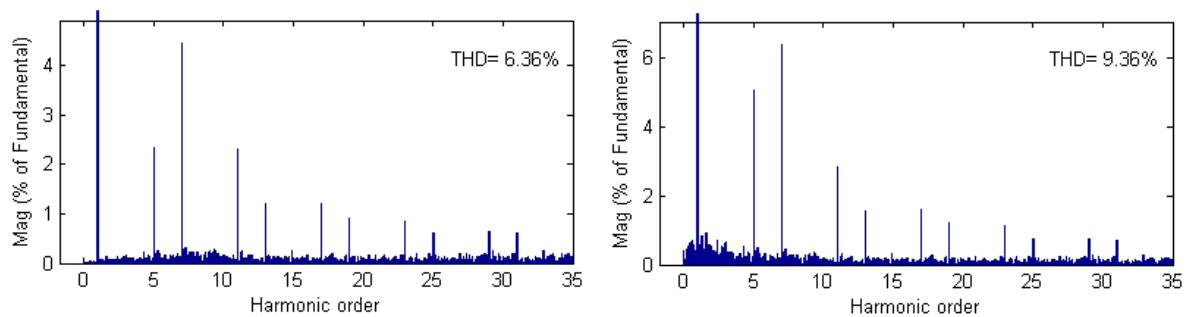


Figura 4.47: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), para a carga não linear sem filtros sincronizados 3 em funcionamento normal.

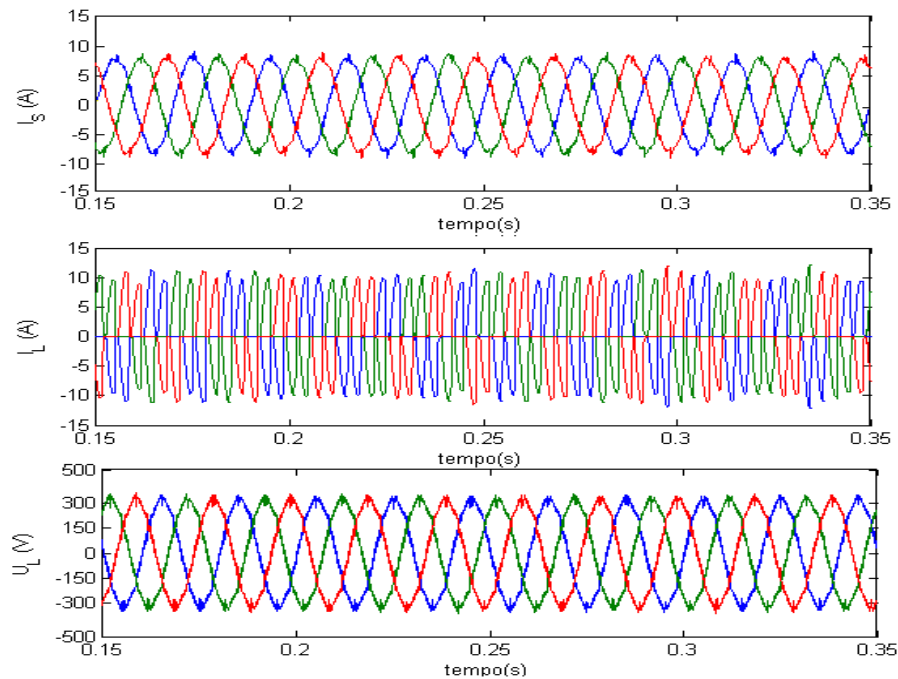


Figura 4.48: Corrente na rede (em cima), corrente na carga (ao centro) e tensão na carga (em baixo).

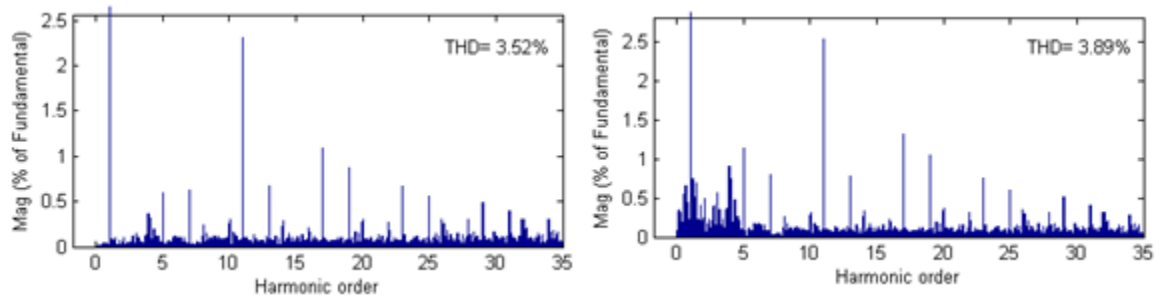


Figura 4.49: Espectro harmônico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), para a carga não linear 3 em funcionamento normal.

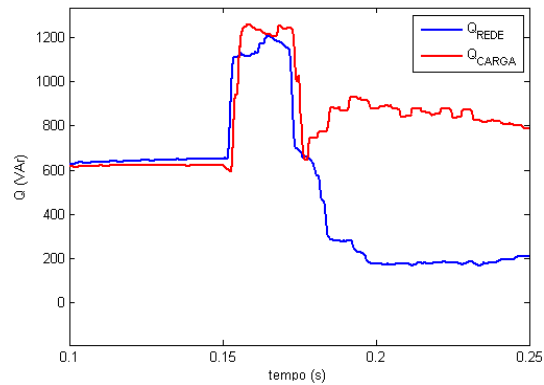


Figura 4.50: Evolução da potência reativa na carga e na rede elétrica, com e sem o FAP ligado.

Como se verifica pela observação da Figura 4.50, o aumento da distorção na corrente da carga não impediu a ação do FAP de atenuação da potência. Na carga 3 foi verificada uma potência reativa na ordem dos 200 VAR, o que representa um valor cerca de 75% inferior ao registado na carga.

⇒ Subtensão Trifásica

Nas próximas figuras são apresentados os resultados decorrentes da simulação da carga não linear 3, quando sujeita a uma subtensão trifásica.

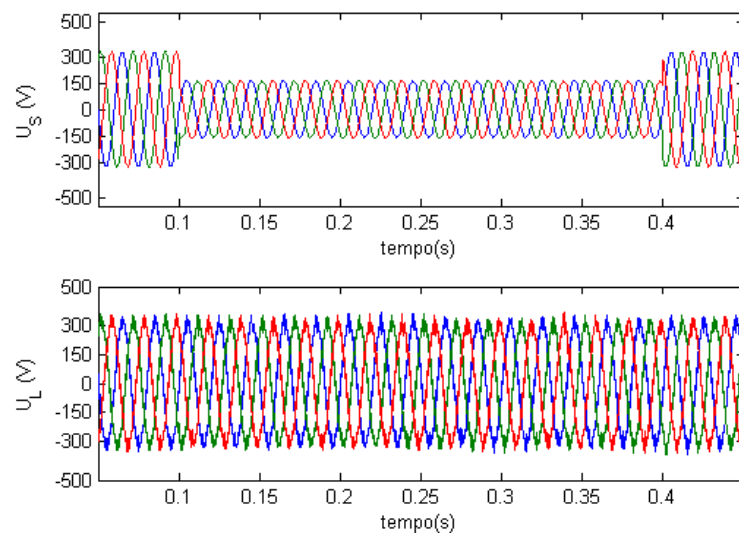


Figura 4.51: Tensão na rede (em cima) e tensão na carga (em baixo) durante uma cava de tensão trifásica.

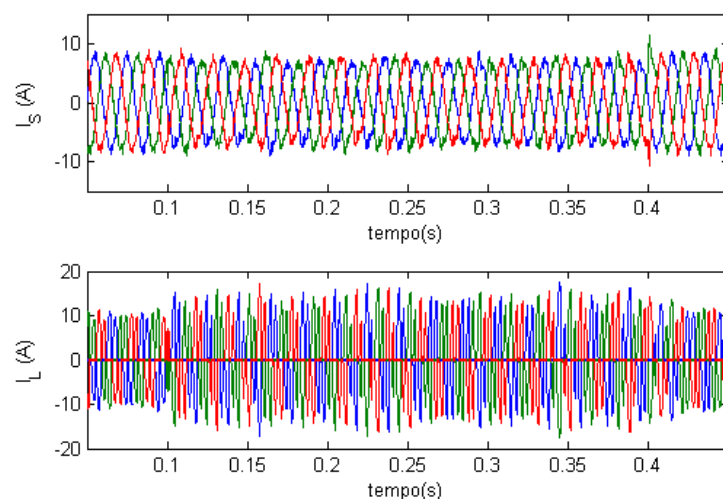


Figura 4.52: Corrente na rede (em cima) e na carga (em baixo) durante uma cava de tensão trifásica.

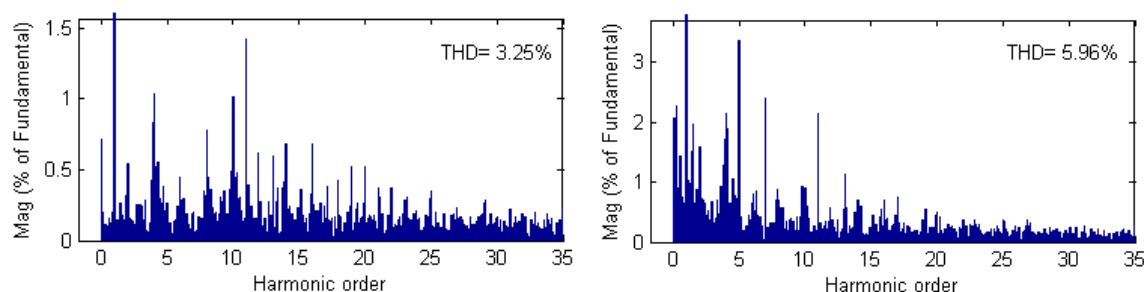


Figura 4.53: Espectro harmónico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), durante o distúrbio de tensão.

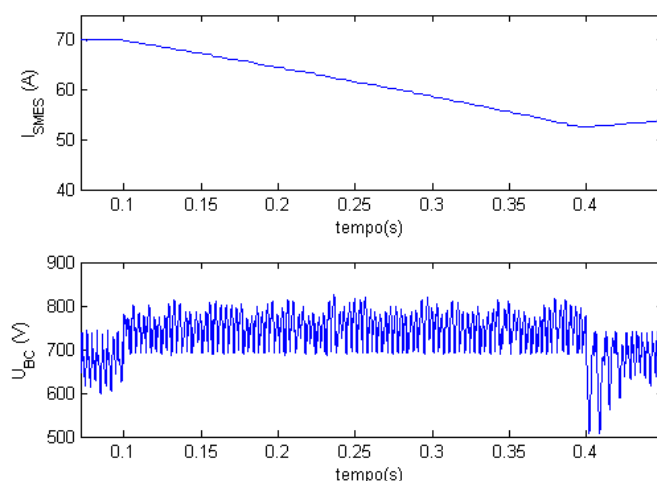


Figura 4.54: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).

Numa perspetiva mais geral, dado os acentuados níveis de distorção harmónica da carga e o profundo afundamento de tensão da rede, consideram-se os resultados obtidos bastante satisfatórios. No entanto, como se verifica pela Figura 5.52, a ação de compensação provoca aumentos nos valores pico a pico da corrente e na tensão de *ripple* do barramento, levando a que a compensação harmónica ao nível da corrente fique um pouco acima dos valores da norma. Destaca-se ainda que a

grande capacitância da carga criou ainda algumas situações adicionais de picos de corrente transitórios (Figura 4.52).

⇒ Sobretensão Trifásica

O último ensaio efetuado serviu para avaliar o comportamento de uma carga de maior caráter capacitivo sujeita a fenômenos de *swells*.

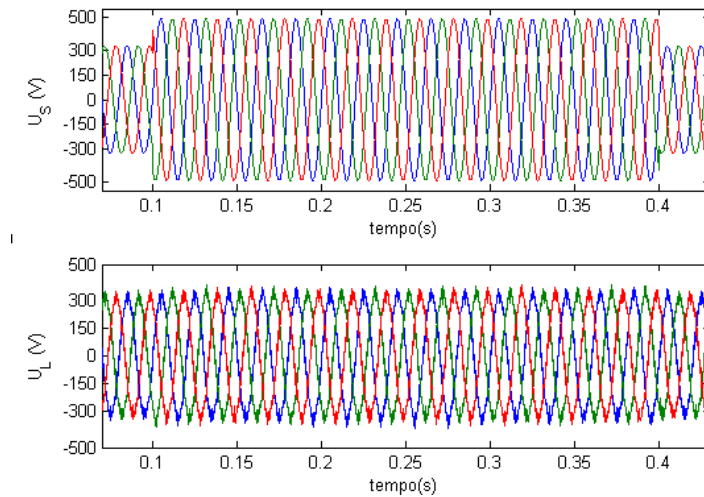


Figura 4.55: Tensão na rede (em cima) e na carga (em baixo) durante uma sobretensão trifásica.

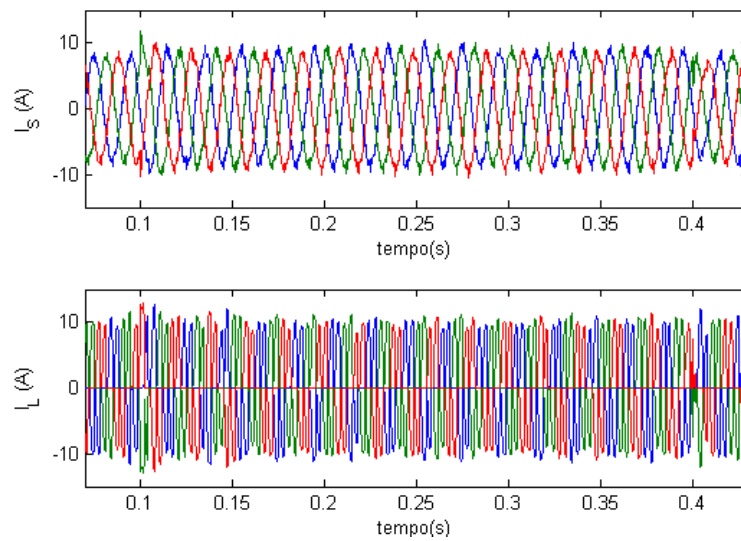


Figura 4.56: Corrente na rede (em cima) e na carga (em baixo) durante uma sobretensão trifásica.

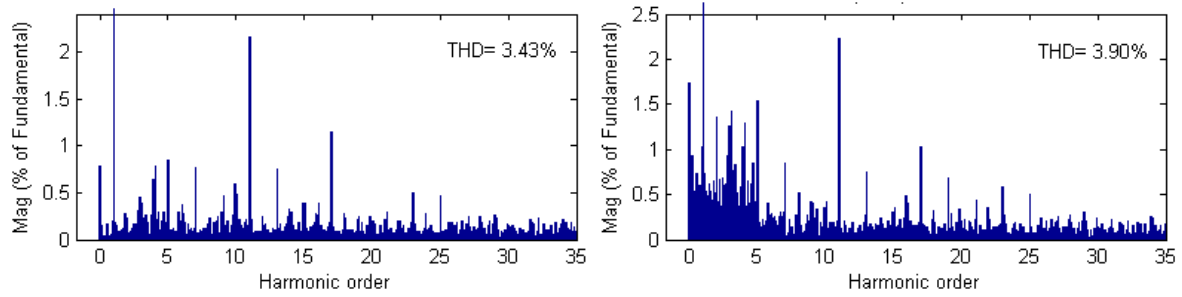


Figura 4.57: Espectro harmônico e THD total da tensão na carga (à esquerda) e corrente na rede (à direita), durante o distúrbio de tensão.

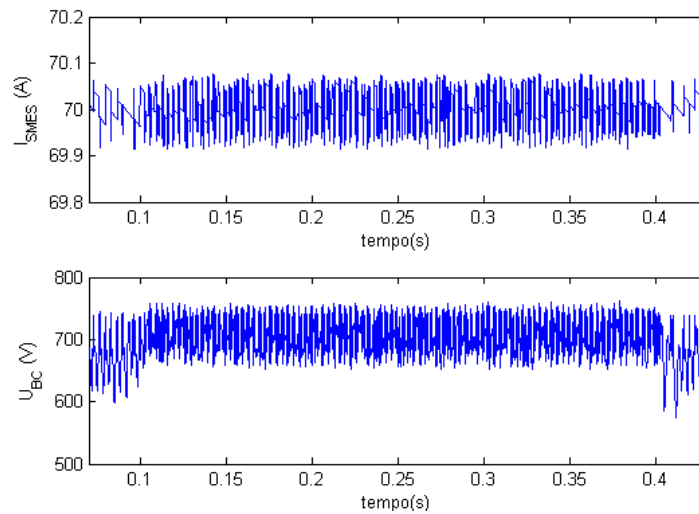


Figura 4.58: Evolução da corrente na bobina SC (em cima) e tensão no barramento (em baixo).

Os resultados obtidos demonstram a eficiência da configuração implementada perante este tipo de distúrbio. O conteúdo o valor global do harmônico encontra-se inserido nos padrões pré definidos por IEEE 512-1992, apenas se verifica um ligeiro excesso de conteúdo harmônico na 11^a harmónica da corrente compensada, que contudo não afetou de forma significativa a magnitude e forma de onda obtida na rede. Destaca-se porém a ocorrência de algum comportamento mais irregular nos momentos de transição entre distúrbios e funcionamento normal.

4.3. Síntese e Conclusões do Capítulo

Neste capítulo apresentaram-se e analisaram-se os resultados obtidos com as simulações efetuadas nas diferentes cargas utilizadas.

No geral ficou clara a eficácia que o sistema implementado demonstrou perante alguns dos mais comuns distúrbios verificados na rede elétrica. Aqui, verificou-se igualmente o bom desempenho demonstrado pelo sistema de dissipação de sobretensões, superando assim uma das lacunas dos *Dynamic Voltage Restores*.

Verificou-se ainda o papel fulcral desempenhado pelos filtros passivos. Estes dispositivos permitiram complementar as ações de filtragem do sistema global, possibilitando que em quase todas as perturbações fossem cumpridos os limites harmónicos impostos pela norma IEEE 512-1992.

5. Conclusões e Trabalho Futuro

5.1. Conclusões

Ao longo desta dissertação foram apresentados os principais constituintes de um sistema que combina filtros ativos com um dispositivo de armazenamento de energia baseado em supercondutores.

No estudo dos filtros ativos identificaram-se topologias em série e em paralelo. As primeiras destinam-se a atenuar distúrbios na tensão enquanto as segundas asseguram a mitigação de correntes harmónicas. A descrição e o estudo aprofundado do funcionamento de cada um destes componentes, permitiu dimensionar a configuração UPQC, que tirou partido das valências individuais das duas topologias.

Da análise dos resultados, conclui-se que a utilização de dispositivo de armazenamento de energia SMES, revelou ser bastante útil em termos de melhoria da compensação em série. Não só garantindo um rápido fornecimento da potência necessário para suprimir cavas, como ajudando a dissipar conteúdos excessivos de energia com origem na rede elétrica. Esta última, considerada uma das maiores limitações dos DVR, pôde ser ultrapassada com o sistema desenvolvido para dissipar a corrente na bobina. Destaca-se ainda que no sistema condicionador de potência implementado em fonte de tensão, foi utilizado um condensador com uma capacidade armazenamento de energia muito inferior à da própria bobina supercondutora, cujo principal objetivo foi filtrar harmónicas de corrente. Também aqui, o sistema de dissipação de corrente na bobina, permitiu auxiliar na manutenção desta tensão.

Os resultados obtidos com as simulações confirmaram as expetativas iniciais do sistema. Verificaram-se melhorias significativas quer ao nível da compensação de distúrbios de tensão, quer na mitigação de conteúdos harmónicos de corrente, em diferentes tipos de cargas. Pelo facto do DVR e do FAP possuírem sistemas de controlo próprios e atuarem de forma independente, foram conseguidos também bons resultados na compensação de distúrbios mistos, ou seja, distúrbios ocorridos ao nível da tensão da rede e com presença de correntes harmónicas provocadas por cargas não lineares. O que leva a concluir que investigações futuras e mais aprofundadas de configurações similares, podem levar à criação de um sistema de referência para melhoria da QEE em redes de distribuição elétrica de todo o mundo.

5.2. Trabalho Futuro

Em ambiente teórico o sistema atingiu resultados bastante satisfatórios, pelo que a implementação de um protótipo poderá ser uma solução interessante para aferir o seu desempenho num ambiente real.

O controlador PI estático utilizado no controlo da tensão do *DC Link*, por possuir sempre os mesmos parâmetros, pode não ser suficiente para responder às variações mais bruscas das

dinâmicas do sistema. A resposta a este problema pode passar pela utilização de um controlador dinâmico. Crê-se que com este tipo de dispositivo, também os tempos de carga da bobina supercondutora possam melhorar. Um controlador dinâmico implementado através de lógica difusa pode ser encontrado em (Ferdí et al., 2010).

O sistema implementado apresenta-se limitado a fazer compensações de interrupções apenas de cariz trifásico. O estudo futuro da possibilidade de utilização de conversores monofásicos à semelhança do implementado com o DVR, poderia resolver esta lacuna.

Nas compensações de subtensões verificou-se por vezes um excesso de energia descarregada pelo SMES, principalmente quando a bobina ainda tem muita energia armazenada, uma forma mais eficiente de fazer este processo pode ser encontrada em (Moghadasi et al., 2010).

Das pesquisas feitas inicialmente, ficou patente a gama de opções que podem contribuir na melhoria da performance do sistema desenvolvido. Nomeadamente:

- Estudar a possibilidade de implementar o mesmo sistema, mas com recurso a uma topologia CSC para o sistema de condicionamento de potência. Apesar de gerar perdas consideráveis na comutação dos seus semicondutores, possui vantagens (em relação à VSC) em termos de velocidade de resposta e menores perdas AC.
- Para implementações que possam exigir ainda menores distorções harmónicas, a utilização de técnicas de modulação mais avançadas, como as baseadas em algoritmos de IA, poderá contribuir para esse efeito.
- A aplicação de topologias multinível também poderá contribuir na melhoria da performance do sistema.

Apesar de existir um consenso geral em trono das vantagens dos dispositivos supercondutores, o seu elevado preço ainda se torna um entrave à sua prospeção. Neste documento já foi referido que cada vez mais se procura utilizar SMES de menores dimensões. Seguindo esse paradigma, e pensando na utilização de um dispositivo similar ao estudado para implementação numa rede elétrica real, uma das formas de economizar a quantidade de material supercondutor necessário, poderia passar por um processo de racionalização das cargas a proteger. Todas as cargas têm a mesma importância? Valerá a pena proteger tudo? Assumindo-se que não, poderia ser interessante o estudo de dispositivos que detetassem a presença (através de uma assinatura própria) de uma carga considerada importante na rede e adptassem a própria instalação elétrica de uma forma automática e flexível, para que apenas esta carga seja protegida pelo sistema implementado, e apenas enquanto estiver conectada à rede elétrica.

6. Bibliografia

- Ali, M., & et al. (2007). Improvement of Wind Generator Stability by Fuzzy Logic-Controlled SMES (pp. 1753–1758). Presented at the ICEMS. International Conference on Electrical Machines and Systems, Coreia do Sul.
- Ali, M., Wu, B., & Dougal, R. (2010). An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 1(1), 38–47.
- Amaro, N. (2013). *Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) for power quality applications* (Thesis Plan Proposal). Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Babei, E., Hosseini, S., & Gharehpetian, G. (2006). A New Topology for Multilevel Current Source Converters. *ECTI Trans. Elec. Eng., Electron. and Communications*, 4(1), 2–12.
- Bilgin, H. (2007). *Design and Implementation of a Current Source Converter Based STATCOM for Reactive Power Compensation* (PhD thesis). Middle East Technical University, School of Natural and Applied Sciences.
- Bollen, M. (2000). *Understanding Power Quality Problems – Voltage Sags and Interruptions* (IEEE Press on power engineering.). Wiley-Interscience.
- Boom, R., & Peterson, H. (1972). Superconductive Energy Storage for Power Systems. *IEEE Trans. Magn.*, MAG-8(3), 701–703.
- Boyra, M. (2012). *Power-flow control and power-quality enhancement in interconnected distribution networks* (PhD thesis). École Doctorale STITS, França.
- Branício, P. (2001). Introdução à Supercondutividade, Suas Aplicações e a Mini-Revolução Provocada Pela Redescoberta do MgB₂: Uma Abordagem Didática. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 23(4), 381–390.
- Buckles, W., & Hassenzahl, W. V. (2000). Superconducting Magnetic Energy Storage. *IEEE Power Engineering Review*, 20, 16–20.
- Casadei, D., Grandi, G., Reggiani, U., & Serra, G. (1998). Analysis of a power conditioning system for superconducting magnetic energy storage (SMES) (Vol. 2, pp. 546–551). Presented at the IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings ISIE'98, Africa do Sul.
- Catalão, R. (2013). *Desenvolvimento de um Sistema de Detecção de Quench baseado em Campo Magnético* (MSc thesis). Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

- Cavalcanti, M., Azevedo, G., Amaral, B., & Neves, F. (2006). Unified power quality conditioner in a grid-connected photovoltaic system. *Electric Power Quality and Utilisation*, 12(2).
- Ceballos, J. (2010). *Analysis of AC losses in superconducting electrical components for application in the design of electrical systems* (PhD thesis). University of Extremadura.
- Chaoui, A., & et al. (2008). On the design of shunt active filter for improving power quality. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 31–37.
- Chapman, D. (2001). *The Cost of Poor Power Quality*. Reino Unido: Copper Development Association.
- Costa, B. (2007). *Compensador de Cavas de Tensão DVR* (MSc thesis). Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- Dahiya, A., Dahiya, R., & Kothari, D. P. (2011). A Comparison of ANN and Fuzzy Controlled STATCOM-SMES for Improving Transient Stability and Frequency Stabilization of SMIB. *MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering*, 1(2), 55–63.
- Denholm, P., Ela, E., Kirby, B., & Milligan, M. (2010). *The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation* (National Renewable Energy Laboratory.). USA.
- Deshmukh, S., & Dewani, B. (2012). Overview of Dynamic Voltage Restorer (DVR) for Power Quality Improvement. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2(6), 1372–1377.
- EDP. (2005). *Manual da Qualidade da Energia Eléctrica*.
- Fatiha, M., Mohamed, M., & Nadia, A. (2011). High Performance of An Unified Power Quality Conditioner Based on a Fuzzy Logic. In A. Eberhard (Ed.), *Power Quality* (InTech.).
- Ferdi, B., Benachaiba, C., Dib, S., & Dehini, R. (2010). Adaptive PI Control of Dynamic Voltage Restorer Using Fuzzy Logic. *Journal of Electrical Engineering: Theory and Application*, 1(3), 165–173.
- Galassi, M. (2006). *Projeto e Construção de um Restaurador Dinâmico de Tensão* (MSc thesis). Universidade de São Paulo.
- Han, B., Bae, B., Kim, H., & Baek, S. (2006). Combined Operation of Unified Power-Quality Conditioner With Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(1).
- Hassenzahl, W. V. (1975). Will superconducting magnetic energy storage be used on electric utility systems? *IEEE Transactions on Magnetics*, 11(2), 482–488.

- Hassenzahl, W. V. (1989). Superconducting magnetic energy storage. *IEEE Transactions on Magnetism*, 22(2), 750–758.
- Hendawi, E., Khater, F., & Shaltout, A. (2010). Analysis, Simulation and Implementation of Space Vector Pulse Width Modulation Inverter (pp. 124–131). Presented at the The 9th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering, Malásia.
- Hoseynpoor, M., Pirzadeh, T., & Sajedi, S. (2011). Economic Assessment of Unified Power Quality Controller Operation in Joint and Separated Modes with DG Units. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 3(9), 963–967.
- Iglesias, I. J., Acero, J., & Bautista, A. (1995). Comparative study and simulation of optimal converter topologies for SMES systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 5(2), 254 – 257.
- Imaie, K., Tsukamoto, O., & Nagai, Y. (2000). Control strategies of multiple current-source PWM converters for a 20 MW SMES system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 15(2).
- Jesus, D. M., & Samesima, M. I. (2007). Avaliação de Desempenho do Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR) na Compensação de Afundamentos e Elevações de Tensão (Vol. 1, pp. 1–6). Presented at the XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTTE, Brasil.
- Jiang, X., & et al. (2001). SMES system for study on utility and customer power applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 11(1), 1765 – 1768.
- Karasik, V., & et al. (1999). SMES for power utility applications: a review of technical and cost considerations. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 9(2), 541 – 546.
- Kim, A.-R., & et al. (2006). The Specification Decision Method of Three Phase Multi Function Power Flow Controller Energized by SMES. In *Power Systems*.
- Lee, D.-H. (1999). *A Power Conditioning System for Superconductive Magnetic Energy Storage based on Multi-Level Voltage Source Converter* (PhD thesis). Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Luongo, C. A. (1996). Superconducting storage systems: an overview. *IEEE Transactions on Magnetism*, 32(4), 2214 – 2223.
- Mansor, M., & Nasrudin, A. (2011). Phase Angle Analysis for Three-Phase PWM-Switched Autotransformer Voltage-Sag Compensator Based on Phase Angle Analysis. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 30(2).

- Middlekauff, S., & Collins, E. (1998). System and customer impact: considerations for series power devices. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13(1), 278–282.
- Milosevic, M. (2003). *Hysteresis Current Control in Three-Phase Voltage Source Inverter* (Relatório Técnico). Suíça.
- Modesto, R. (2007). *Método de Compensação Ativa de Potência Aplicado a um Filtro Ativo Paralelo Monofásico* (MSc thesis). Universidade Estadual de Londrina.
- Moghadasi, A., Torabi, S. M., & Salehifar, S. (2010). Performance Evaluation of Unified Power Quality Conditioner with SMES (pp. 1–6). Presented at the Power Quality Conference (PQC), 2010 First, Irão: IEEE.
- Molina, M. G., & Mercado, P. E. (2010). Power Flow Stabilization and Control of Microgrid with Wind Generation by Superconducting Magnetic Energy Storage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(3), 910 – 922.
- Monteiro, L. (2008). *Contribuições Para Otimização do Desempenho do Condicionador UPQC (Unified Power Quality Conditioner)* (PhD thesis). Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Naidoo, R., & Pragasen, P. (2007). A New Method of Voltage Sag and Swell Detection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(2), 1056–1063.
- Neto, A. (2009). *Filtros Ativos Paralelos Aplicados a Sistemas Elétricos Trifásicos a Quatro Fios* (MSc thesis). Universidade Estadual de Londrina.
- NIPE / UNICAMP. (2005). *(GDEE) Geração Distribuída de Energia Eléctrica*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Nogueira, A. (2010). *Desenvolvimento de um UPQC Monofásico com Transformador no Condicionador Série* (MSc thesis). Universidade do Minho.
- Oliveira, J. (2010). *Sistema de Armazenamento de Energia em Bobinas Supercondutoras* (MSc thesis). Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Onnes, H. (1913). Investigations into the properties of substances at low temperatures, which have led, amongst other things, to the preparation of liquid helium. In *Leitura de entrega do prémio Nobel da Física*.
- Pakharia, A., & Gupta, M. (2012). Dynamic Voltage Restorer for Compensation of Voltage Sag and Swell: A Literature Review. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 4(1), 347–355.

- Patel, M., Patel, A., Vyas, D., & Patel, K. (2009). Use of PWM Techniques for Power Quality Improvement. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(4), 99–102.
- Patel, S., Purohit, J., & Panchal, J. (2011). Newest Electrical Energy Storage System: SMES and SCES. Presented at the National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology, India.
- Pina, J. (2010). *Desenho e Modelização de Sistemas de Energia Empregando Materiais Supercondutores de Alta Temperatura* (PhD thesis). Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Pires, I. (2010). Medidas de mitigação de harmônicos. *O Setor Elétrico*. Brasil.
- Pregitzer, R. (2006). *Simulações Computacionais de Filtros Activos de Potência em Condições Reais de Operação* (MSc thesis). Universidade do Minho.
- Pronto, A. (2010). *Análise de perdas em sistemas de energia que empregam materiais supercondutores de alta temperatura* (PhD thesis). Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Ramchandra, N., & Kalyanchakravarthi, M. (2012). Neuronal Network Based Unified Power Quality Conditioner. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2(1), 359–365.
- Rao, R., & Dash, S. (2010). Power Quality Enhancement by Unified Power Quality Conditioner Using ANN with Hysteresis Control. *International Journal of Computer Applications*, pp. 9–15.
- Rashid, M. (2011). *Power Electronics Handbook : Devices, Circuits, and Applications* (3rd ed.). USA.
- Rosenbauer, F., & Lorenzen, H. W. (1996). Behaviour of IGBT Modules in the Temperature Range from 5 to 300 K (Vol. 41, pp. 1865–1872). Presented at the Advances in Cryogenic Engineering, Plenum Press.
- Sajedi, S., Khalifeh, F., Karimi, T., & Khalifeh, Z. (2011). Investment Cost Investigation of Universal Power Quality Controller System Operation with and without Combination by Distributed Generation System. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(9), 2217–2223.
- Santos, I. (2011). *Método da Superproposição Modificado Como uma Nova Proposta de Atribuição de Responsabilidades Sobre Distorções Harmônicas* (PhD thesis). Universidade Federal de Urbelândia.
- Saunders, G., & Ford, P. (2004). *The Rise of the Superconductors*. CRC Press.
- Schneider, E. (2003). Qualidade de Energia - Harmônicas.

- Seymour, J. (2005). The Seven Types of Power Problems. Schneider Electric.
- Sharanya, M., Basavaraja, B., & Sasikala, M. (2012). An Overview of Dynamic Voltage Restorer for Voltage Profile Improvement. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2(2), 26–29.
- Sheikh, M. R. I., & Mondol, N. (2012). Stability enhancement of wind farm integrated power system during unsuccessful reclosing of circuit breakers (pp. 397 – 403). Presented at the 2012 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), India: IEEE.
- Siahi, M., Najafi, M., Hoseynpoor, M., & Ebrahimi, R. (2011). Design and Simulation of UPQC to Improve Power Quality and Transfer Power of Photovoltaic Array to Grid. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(3), 662–673.
- Sutanto, D., & Aware, M. V. (2009). Improved Controller for High Temperature Super Conducting Magnetic Energy Storage (HTS-SMES) (pp. 361 – 364). Presented at the Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, China: IEEE.
- Tay, H. C., & Conlon, M. F. (1998). Development of a SMES system as a fluctuating load compensator. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 145(6), 700–708.
- Taylor, P., & et al. (2012). *Factsheet to accompany the report “Pathways for energy storage in the UK”* (No. 7). Reino Unido: The Centre for Low Carbon Futures 2011. Retrieved from http://www.lowcarbonfutures.org/sites/default/files/SMES_final.pdf
- Teke, A. (2011). *Unified Power Quality Conditioner: Design, Simulation and Experimental Analysis*. (PhD thesis). Çukurova University.
- Teke, A., & Tümay, M. (2011). Unified Power Quality Conditioner: A Literature Survey. *Journal of Electrical Systems*, 7(2), 122–130.
- Variath, R., Andersen, M., Nielsen, O., & Hyldgård, A. (2010). A review of module inverter topologies suitable for photovoltaic systems (pp. 310–316). Presented at the IPEC.
- Xue, X. D., Cheng, K. W., & Sutanto, D. (2005). Power system applications of superconducting magnetic energy storage systems (Vol. 2, pp. 1524 – 1529). Presented at the Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, IEEE.

7. Anexos

Anexo 1- Norma IEC 61000-2-2

A norma IEC 61000-2-2 define os valores de conteúdo harmónico admissíveis em sistemas baixa tensão. Os valores referidos nesta norma são bastante próximos dos valores norma NP EN 50160:2001, aplicada em Portugal.

Tabela 7.1: Limites de compatibilidade harmónica de tensão para redes BT.

Tensões harmónicas ímpares				Tensões Harmónicas Pares	
Não múltiplas de 3		Múltiplas de 3			
Ordem	Tensão relativa (%)	Ordem	Tensão relativa (%)	Ordem	Tensão relativa (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	6	0,5
13	3	21	0,3	8	0,5
$17 \leq h \leq 49$	$2,25 \times (17/h) - 0,27$	$17 \leq h \leq 49$	0,2	$10 \leq h \leq 50$	$0,25 \times (10/h) + 0,25$

h designa a ordem harmónica.

O limite de THD total não deve exceder os 8%.

Anexo 2- Norma IEEE 519-1992

Tabela 7.2: Limites percentuais de harmónicas de corrente para sistemas com tensões entre 120V e 69 kV.

I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	THD Total
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
$20 < 50$	7	3,5	2,5	1	0,5	8
$50 < 100$	10	4,5	4	1,5	0,7	12
$100 < 1000$	12	5,5	5	2	1	15
≥ 1000	15	7	6	2,5	1,4	20

h designa a ordem harmónica.

Tabela 7.3: Limites percentuais de harmónicas de tensão.

Tensão	Magnitude Individual	THD Total
≤ 69 kV	3	5
69,001-161 kV	1,5	2,5
> 161 kV	1	1,5

Anexo 3 – Bloco Fim de Interrupção

Este bloco detecta o momento em que uma interrupção deixa de existir, mas mantém no sinal de saída por mais 4 ms, a informação de falha.

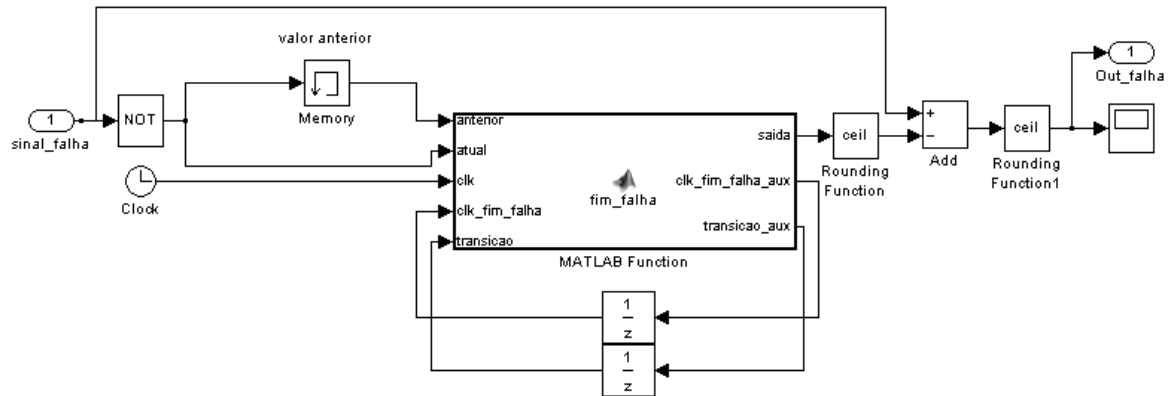


Figura 7.1: Bloco que detecta o fim de uma interrupção.

Função *fim_falha*:

```
function [saida,clk_fim_falha_aux,transicao_aux] = fim_falha(anterior,atual,clk,clk_fim_falha,transicao)

%%situação é considerada final de falha quando passa de 1 para 0

if (transicao==1),
    transicao_aux=1; %por default a 'transicao' esta off, pois so é acionada dps do final de uma falha
else
    transicao_aux=0;
end;

clk_fim_falha_aux=clk_fim_falha; %por default a 'transicao' esta off, pois so é acionada dps do final de uma

if(anterior==1)&&(atual==0),
    transicao_aux=1;
    clk_fim_falha_aux=clk; %é iniciado o periodo de transicao (este estado só deve ser assim durante uma amostra)
end;

if (transicao_aux==1)&&(clk-clk_fim_falha_aux>=0.004),
    clk_fim_falha_aux=0;
    transicao_aux=0;
end %se passam os 4ms acaba o periodo de transicao

if(transicao_aux==1),
    saida=1;
else
    saida=0;
end;
```

